



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

DINO NERWEYI
JET PUMPIN MATERIAALITARKASTELU
Diplomityö

Tarkastaja: professori Veli-Tapani
Kuokkala
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
teknisten tieteiden tiedekunnan
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
14. kesäkuuta 2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Materiaalitekniikan koulutusohjelma

NERWEYI, DINO: Jet Pumpin materiaalitarkastelu

Diplomityö, 85 sivua

Marraskuu 2014

Pääaine: Metallimateriaalit

Tarkastaja: professori Veli-Tapani Kuokkala

Avainsanat: abrasiivinen kuluminen, eroosiokuluminen, kavitaatiokuluminen, Jet Pump, erikoisteräkset, pinnoitteet, lämpökäsittely, materiaalivalinta.

Jet pump -tekniikka on ollut käytössä jo useampia kymmeniä vuosia, ja sitä on kehitetty eteenpäin kaiken aikaa. Koska laitteistoja käytetään hyvin vaativissa olosuhteissa, ne altistuvat erittäin monipuoliselle kulumiselle, joka voi lyhentää laitteiston käyttöikää merkittävästi. Jet pumpin kohtaaman kulumisen ymmärtäminen onkin ensiarvoisen tärkeää onnistuneen materiaalivalinnan kannalta. Työn tilaaja antoi myös tiettyjä reunaeh-toja ja toivomuksia, jotka koskivat materiaaleja, valmistusmenetelmiä sekä pinnoitteiden käytön mahdollisuutta, joihin työssä on pyritty vastaamaan parhaalla mahdollisella tavalla. Tässä työssä on tutkittu jet pumpin kokemaa kulumista ja selvitetty sen primääristä kulumismekanismeja.

Työ jakaantuu kahteen osaan: Kirjallisuustutkimusosassa tarkastellaan erilaisia kulumismekanismeja ja kavitaation vaikutusta kulumiseen. Primääristen kulumismekanismien määrittäminen on erittäin haastavaa, koska kuluminen on aina dynaaminen ja monisyinen prosessi. Erilaiset kulumismekanismit voivat toimia synergisesti, päällekkäin, tai eri mekanismit voivat olla primäärisiä kulumisen eri vaiheissa. Työn toinen osa on käytännönläheisempi. Siinä esitellään tutkittavat osat sekä niiden tämän hetkinen rakenne. Toisessa osassa esitellään myös osien yleisimmin kärsimät vauriot sekä käydään läpi parempia materiaalivaihtoehtoja nykyisten tilalle.

Tämä tutkimus osoittaa, etteivät näissä jet pumpeissa tällä hetkellä käytetyt materiaalit ole parhaita mahdollisia. On olemassa seoksia, jotka kestävät komponenttien kokemaa kulutusta nyt käytettyjä seoksia huomattavasti paremmin. Materiaalivalinta on pyritty pitämään suhteellisen konservatiivisena, koska uusien ja vieraiden materiaalikategorioiden käyttämisessä on aina omat haasteensa, joiden ennakoiminen voi kuitenkin olla hankalaa. Työn tuloksena suositellaan, että jet pumpilla tulisi suorittaa kulutuskokeita joko kentällä tai laboratorioissa, jotta esitetystä materiaalivalinnasta saataisiin lisää kokemusta ja tietoa. Nykyisten materiaalien mikrorakenne ja toimitustilat täytyisi myös tuntea läpikotaisin. Komponenttien kulumisen seuranta, olosuhteiden ja niiden muutosten sekä käyttöprofiilien kirjaaminen olisi ensiarvoisen tärkeää onnistuneen materiaalivalinnan tueksi. Muussa tapauksessa voidaan esittää vain valistuneita arvioita.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Material Science

NERWEYI, DINO: Jet Pump Material Analysis

Master of Science Thesis, 85 pages

November 2014

Major: Metal materials

Examiner: Professor Veli-Tapani Kuokkala

Keywords: Wear, abrasive wear, erosive wear, cavitation wear, jet pump, high performance steels, coatings, heat treatments, choosing materials

Jet pumps have already been used for quite some time and they have been further developed ever since their introduction. Because jet pumps are used in very severe conditions, they experience a multitude of different types of wear. This wear can considerably shorten their lifetime expectancy. The company that ordered this study enquired about the possibility of using certain materials, coatings and manufacturing processes. In this thesis the types of wear the jet pumps undergo have been studied and the primary wear mechanism tried to be identified. It is extremely important to understand the underlying reasons of wear to be able to make a successful choice of materials for jet pumps. In this thesis, answers to all these questions have been sought after.

This thesis is divided into two parts. In the scientific literature part the focus is on the effects that different wear mechanisms and cavitation have on total wear. Defining the primary wear mechanisms is always a challenging task because wear is a very complex and dynamic phenomenon. Different wear mechanisms might operate together or have synergistic qualities in them. The primary wear mechanisms may also change in different stages of wear. The second part of this thesis is much more pragmatic: there all the components, their materials and their structures are presented. This chapter presents the most common damages these components suffer and what could be considered a better material choice for all of them.

This thesis suggests that the materials used in the studied jet pump are not optimal and that alloys that can withstand these types of wear better do exist. The material choice is kept quite conservative because using new and unfamiliar material groups will give way to a new set of issues. Anticipating all of them would be nigh on impossible. To gather more information and data, it is suggested this jet pump to undergo comprehensive wear experiments either in the field or in the laboratory. The current alloys, microstructures and heat treatments also have to be thoroughly known. Monitoring the components' wear, changes in the conditions and operating times should be taken as an utmost priority because it gives a solid basis for a successful material choice. Otherwise, only educated guesses can be made.

ALKUSANAT

Kiitän tästä diplomityömahdollisuudesta Wellquip Oy:tä, Sakari Ojaa, Antti Ajosmäkeä, Esa Puputtia, Mikko Koposta sekä kaikkia kollegoita. Tahdon kiittää professori Veli-Tapani Kuokkalaa inspiroivista keskusteluista ja loppumattomasta tuesta. Kiitokset myös Juha Nykäselle, Ville Oksaselle sekä koko TTY:n väelle, joiden ansiosta tämä työ valmistui.

Erityiskiitos vanhemmilleni. Ilman teitä tämä ei olisi ollut mahdollista.

Omistan tämän työn rakkaimmilleni, vaimolleni Minnalle sekä tyttarellemme Lounalle.

SISÄLLYS

Abstract	iii
Termit ja niiden määritelmät	vii
1 Johdanto	1
2 Kulumisilmiöt	2
2.1 Mitä kuluminen on?	2
2.1.1 Kulumismekanismit	5
2.2 Abrasiivinen kuluminen	5
2.2.1 Kahden kappaleen abrasiivinen kuluminen	6
2.2.2 Kolmen kappaleen abrasiivinen kuluminen	6
2.2.3 Abrasiivisen kulumisen mekanismit	7
2.2.4 Abrasiivipartikkelin muodon vaikutus kulumiseen	8
2.2.5 Abrasiivipartikkelin kovuuden vaikutus kulumiseen	9
2.2.6 Abrasiivin partikkelikoon vaikutus kulumiseen	10
2.2.7 Teräksen mikrorakenteen vaikutus kulumisen keston	11
2.2.8 Lämpötilan vaikutus abrasiiviseen kulumiseen	12
2.2.9 Kosteuden vaikutus abrasiiviseen kulumiseen	14
2.2.10 Abrasiivisen kulumisen hallinta	15
2.3 Eroosiokuluminen	16
2.3.1 Eroosiokulumismekanismit	16
2.3.2 Partikkelin iskeytymiskulma ja iskeytymisnopeus	19
2.3.3 Partikkelin kovuus, muoto ja mineraalikoostumus	21
2.3.4 Partikkelikoon vaikutus	22
2.3.5 Partikkelivirtauksen määrä	24
2.3.6 Eroosiokulumismekanismit nesteillä	25
2.3.7 Lämpötilan vaikutus eroosiokulumiseen	27
2.3.8 Eroosioväliaineen vaikutus kulumiseen	30
2.3.9 Eroosiokulumiskestävyyden lisääminen	33
2.4 Kavitaatio	37
2.4.1 Kulumismekanismit	37
2.4.2 Microjets	39
2.4.3 Kavitaatioeroosio	41
2.4.4 Kavitaatioeroosiokulumisen eri vaiheet	43
2.4.5 Mikrorakenteen ja raekoon vaikutus kavitaation keston	45
2.4.6 Materiaalien kavitaation kesto ja siihen vaikuttavat tekijät	48
3 Komponentit ja niiden toiminta	54
3.1 Jep pump -laitteisto	54
3.1.1 Suutin	57
3.1.2 Sekoitinputki (diffuusori)	58
3.1.3 Carrier -runko	59
3.1.4 Bottom nut	60

3.1.5	Housing	61
4	Materiaalin valinta ja sen vaatimukset	62
4.1	Vaatimukset.....	62
4.2	Koneistamalla vai valamalla?	63
4.3	Soveltuvat seokset.....	63
4.3.1	Perinteiset teräkset	63
4.3.2	Runsaasti seostetut teräkset.....	64
4.3.3	Kovametallit.....	65
4.3.4	Ruostumattomat teräkset.....	68
4.4	Pinnoitteet	69
4.4.1	Ruiskutettavat termiset pinnoitteet.....	70
4.4.2	Lämpökäsittely.....	72
4.5	Muutosehdotukset	73
4.5.1	Suutin	74
4.5.2	Sekoitinputki (diffuusori).....	74
4.5.3	Bottom nut.....	75
4.5.4	Carrier -runko.....	77
4.5.5	Housing	78
4.6	Valmistusmenetelmät ja valmistajia Suomessa	78
5	Johtopäätökset.....	79
	LÄHTEET.....	82

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Alumina	Alumiinioksidi, Al_2O_3
Annulus	Rengasmainen tila Jet Pumpissa, annulustila.
Average spacing of defects	Materiaalin sisältämien vikojen keskimääräinen etäisyys
Binder mean free path	Vapaa kulkumatka matriisissa
Cermet	Komposiittimateriaali keraamista ja metallista
Collision efficiency	Törmäystehokkuus, suhdeluku pintaan törmäävien partikkelien ja teoreettisen, ilman väliainetta tapahtuvien törmäysten lukumäärän välillä
Fluid	Sekä kaasumaisia ja nestemäisiä aineita
Fluxrate	Partikkelivirtauksen määrä
Fly ash	Lentotuhka
Fragmenting	Hauras sirpaloituminen
Halo	Sädekehä; verrattain kulumaton rengasmainen alue kulumakohdan ympärillä.
HNAS	Korkeatyyppiset austeniittiset teräkset (high-nitrogen austenitic steels)
Inlet	Sisääntulopuoli, esim. turbiinissa tai pumpussa.
Kestoraja -parametri	Nollasyklin kohdalla olevan nimellisen väsymismurtumajännityksen sekä plastisen muodonmuutoksen aikaisen jännityksen kasvun eksponentin välinen tulo.
Kolstering	Hellävarainen pintahiiletysmenetelmä, kolsterointi
Nozzle	Jet Pumpin suutin
PKK	Pintakeskeinen tiivispakkaus

Pressure release wave	Paineen vapautumisaalto
Reservoir	Öljyesiintymä
Slurry	Eroosiopartikkelien ja nestemäisen väliaineen sekoitus
Stacking Fault Energy	Pinousvikaenergia (SFE)
Substraatti	Pintakäsittelyn tai pinnoitteen alla oleva perusmateriaali
Throat inlet	Jet Pumpin nielun tuloaukko
UHMWPE	Ultra-high-molecular-weight polyethylene, erittäin korkean molekyylipainon polyeteeni
TKK	Tilakeskeinen tiivispakkaus

1 JOHDANTO

Kuluminen kaikissa eri muodoissaan on suuri haaste. Jokainen kulumistapahtuma on omanlaisensa ja riippuu koko systeemistä. Kulumiseen vaikuttavia parametreja voi siis olla useita kymmeniä.

Tässä työssä käsitellään jet pumpin kulumista ja erityisesti kulumisilmiöiden ehkäisyä oikeanlaisilla materiaalivalinnoilla. Jet pump on öljyteollisuudessa käytettävä laite, jolla nostetaan raakaöljyä lähteestä. Laitteen toimintaympäristö on hyvin vaativa, ja suurimmat haasteet tulevat korroosion ja kulumisen kestosta.

Työn perustaksi suunniteltiin materiaalikoekteita. Näiden kokeiden tarkoituksena oli selvittää nyt käytettävät materiaalit ja niiden heikkoudet. Samalla olisi selvinnyt myös primäärisiä kulumismekanismeja. Kokeita ei kuitenkaan päästy toteuttamaan tällä erää.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan tällä hetkellä jo olemassa olevaa konstruktiota ja sen kohtaamia vaikeuksia. Peruslähtökohta on se, että nyt käytössä olevia materiaaleja ei ole täysin optimoitu käyttökohteeseensa. Komponentteihin on siis mahdollista löytää paremmin soveltuvia materiaaleja. Materiaalivalikoimaa ei rajoitettu tutkimuksen alussa millään tavalla.

Työn edetessä alkoi kuitenkin käydä yhä selvemmäksi, että materiaalivalikoimaa on järkevä rajoittaa teräksiin ja kovametalleihin. Keraamien, polymeerien sekä erilaisten komposiittien käyttöä harkittiin, mutta niiden käytöllä ei olisi saatu mitään etua, ja useissa tapauksissa tilanne oli juuri päinvastoin. Materiaalivalinta kohdentui erilaisiin metalleihin, pääsääntöisesti korroosiota hyvin kestäviin seoksiin.

Työn edetessä kohti loppuaan alkoi vastauskin näyttää entistä selvemmältä, koska tarjolla on käytännössä vain yksi toimittaja, joka kykenee valmistamaan halutunlaiset komponentit ja ko. toimittaja on myös kiinnostunut yhteistyöstä.

2 KULUMISILMIÖT

Tässä kappaleessa esitellään ensin yleisesti erilaisia kulumisilmiöitä. Tämän jälkeen niitä tutkitaan tarkemmin Jet Pump:n näkökulmasta. merkittävimmiksi ja kiinnostavimmiksi aiheiksi nousevat abrasiivinen kuluminen sekä eroosio- ja kavitaatiokuluminen.

2.1 Mitä kuluminen on?

Kivioja et al. määritelmän mukaan:

”Kuluminen on seurausta toisiaan vastaan liikkuvien pintojen keskinäisestä vuorovaikutuksesta. Se ilmenee materiaalihäviönä kappaleen/kappaleiden pinnalta.” [1, s. 97.]

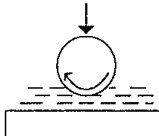
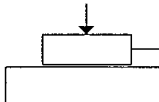
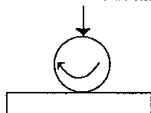
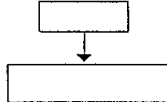
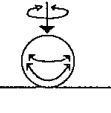
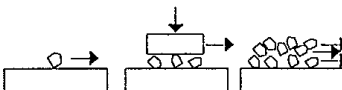
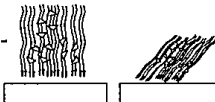
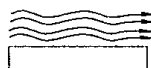

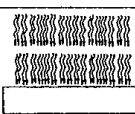

Kuluminen on siis määritelmänsä mukaan materiaalihäviötä. Tällaisen materiaalihäviön vähentäminen tai poistaminen kokonaan olisi kansantaloudellisesti äärettömän merkittävää. Kulumisesta seuraavat kulut lasketaan maailmanlaajuisesti vuosittain miljardeissa dollareissa. On arveltu, että korkeasti teollistuneissa maissa kitkasta ja kulumisesta aiheutuvat kulut ovat noin 5 prosenttia maapallon jokaisen maan bruttokansantuotteesta. [2] On siis selvää, että kuluminen ja sen toimintamekanismit ovat erityisen tärkeitä tutkimuskohteita.

Abrasiivinen kuluminen ja eroosiokuluminen ovat yleisiä kulumisen muotoja. Ne syntyvät partikkelin ja kiinteän materiaalin välisestä vuorovaikutuksesta. [3] Abrasiivinen kuluminen on materiaalihäviötä, jonka aiheuttavat pintaa pitkin liikkuvat kovat partikkelit. Eroosiokulumisen aiheuttavat puolestaan kiinteään pintaan iskeytyvät partikkelit. Kavitaatiokulumisen aiheuttaja on kaasukuplien luhistuminen ja sen synnyttämät paikalliset nesteen iskeytymiset vasten pintaa. Abrasiivinen kuluminen ja eroosiokuluminen ovat erityisen nopeita ja ankaria kulumisen muotoja, ja ne voivat aiheuttaa huomattavia kustannuksia, ellei niitä kyetä hallitsemaan tarpeeksi tehokkaasti. [4] Vaikka näillä kaikilla kolmella kulumistyyppillä on yhteisiä piirteitä, niillä on myös joitain perustavaa laatua olevia eroja, kuten esimerkiksi se, että nestepartikkeli kykenee aiheuttamaan eroosiota muttei abraasiota. Tämänkaltaiset erot täytyy ottaa tarkasti huomioon valittaessa kulutukselle alttiita materiaaleja, koska abrasiivisella kulumisella, eroosiokulumisella ja kavitaatiokulumisella on kaikilla erilaiset mikroskooppisella tasolla toimivat kulumismekanismit. [5, s. 501]

Kysymykseksi nouseekin, missä abrasiivista kulumista, eroosiokulumista ja kavitaatiokulumista todennäköisimmin tapahtuu? Milloin näitä kulumistyypejä esiintyy ja miten ne voidaan todeta? Mitkä ovat niiden erot ja millaisia yhtäläisyyksiä niillä on? Tehoaako niitä kaikkia vastaan sama suojaamistoimenpide, esim. seinämävahvuuden lisääminen? Tukahduttaako kovemman materiaalin käyttö kaikki tai vain yhden edellä mainituista kulumistyypeistä? Tällaisiin ja moniin muihin kysymyksiin pitää insinöörin löytää oikeita vastauksia. [5, s. 501]

Yksiselitteistä ja yksinkertaista matemaattista mallia kulumisesta ei vielä olla kyetty luomaan, vaikka aihetta tutkitaankin ankarasti. Tutkimus lepääkin pitkälti vielä empiirisen tiedon pohjalla. Kulumismekanismien täydelliseen selittämiseen ei vielä kyetä. Kuluminen mallintavien teorioiden paikkansapitävyydestä ja sovelluskelpoisuudesta käydään akateemisissa piireissä melko kipakkaa keskustelua. Kuluminen ei ole myöskään aina yksiselitteisesti negatiivinen ilmiö. Joissain tapauksissa on peräti haluttua, että komponentti tai pinta kuluu hallitusti. Tällaisella tavoitellaan esim. pinnan muokkautumista ja siitä saatavia hyötyjä. [1, s. 97]

Kuluminen on mahdollista myös luokitella sitä aiheuttavan liikkeen mukaan. Tällöin saadaan kuusi eri kategoriaa, jotka ovat: liukuminen, vierintä, iskukuormitus, värähtely, nestevirtaus ja nestevirtaus, jossa on kiinteitä partikkeleita. Asiaa voidaan tarkastella myös lujuusopin kautta. Tällöin kulumistapahtumaa voidaan tutkia ulkoisten kuormitusten, esim. vedon, puristuksen, taivutuksen tai väännön aikaansaannoksena tai tuhoutumismekanisminsa, esim. hauras murtuma, kautta. Kuvassa 1 on esitelty kulumisen jaottelua. Kuvasta voidaan huomata, että esim. kiinteän pinnan ja nestevirtauksen, joka sisältää kiinteitä partikkeleita, vuorovaikutus on eroosiokulumista tai eroosiokorroosiota, mutta primäärinen kulumismekanismi voi olla abraasio, pinnan väsyminen tai triboke-miallinen kuluminen. Kulumisen tunnistamisessa ja määrittelyssä täytyykin olla erityisen tarkkana, miltä kannalta asiaa tarkastelee.

Systeemin rakenne	Kulumisen aiheuttava rasitustyyppi	Kulumis-tyyppi	Kulumismekanismi			
			Adheesio	Abraasio	Pinnan väsyminen	Tribo-kemiallinen
Kiinteiden pintojen välissä voiteluaine	Liukuminen Vierintä Isku Sysäykset 				X	X
Kiinteät pinnat toisiaan vasten	Liukuminen 	Liukumis-kuluminen	X	X	X	X
	Vierintä 	Vierintä-kuluminen	X	X	X	X
	Iskukuormitus 	Isku-kuluminen	X	X	X	X
	Värähtely 	Värähtely-kuluminen	X	X	X	X
Kiinteät pinnat ja kulumispartikkeli	Hionta 			X		
Kiinteät pinnat ja partikkelit	Partikkeli-suihku 	Eroosio		X	X	X
Kiinteä pinta ja kaasu	Virtaus 	Kaasu-eroosio				X
Kiinteä pinta ja neste	Virtaus Värähtely 	Kavitaatio			X	X
	Virtaus Isku 	Pisara-eroosio			X	X
Kiinteä pinta ja nesteessä kuluttavia partikkeita	Virtaus 	Eroosio		X	X	
		Korroosio-eroosio		X	X	X

Kuva 1. Kulumisen luokittelu kuluttavan rasituksen ja kulumismekanismien mukaan. [1, s. 102]

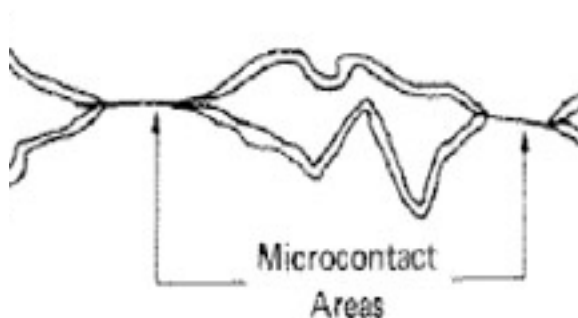
Tässä työssä keskitytään lähinnä kulumismekanismien mukaiseen luokitteluun ja erityisesti abrasiiviseen kulumiseen, eroosiokulumiseen ja kavitaatiokulumiseen sekä näiden

erilaisiin yhdistelmiin. Kulumismekanismeja esitellään yksityiskohtaisemmin seuraavassa kappaleessa.

2.1.1 Kulumismekanismit

Kuluminen voidaan karkeasti jaotella kulumismekanismin mukaan neljään eri kategoriaan, jotka ovat adheesio, abraasio, pinnan väsyminen ja tribokemiallinen kuluminen. Tästä seuraava materiaalihäviö saattaa syntyä yksittäisen mekanismin aiheuttamana, mutta useimmin muutaman tai useamman mekanismin yhdistelmänä. Kulumisen käytännön sovelluksissa johtuukin yleensä aina useampien kulumismekanismien yhtäaikaista toiminnasta ja vuorovaikutuksesta. [1, s. 100]

Kulumista aiheuttavat mikrokontaktit syntyvät vastinpintojen kohdatessa toisensa. Pinnankarheuden huippujen keskinäisiä kosketuksia kutsutaan mikrokontakteiksi. Kuva 2 esittelee kahden pinnan välisiä mikrokontakteja. Kuvassa pinnat on suurennettu moninkertaisesti, jolloin käy ilmi, etteivät toisiaan vasten olevat pinnat todellisuudessa ole tasaisia. [1, s. 100]



Kuva 2. Mikrokontakteja pintojen välillä. [6]

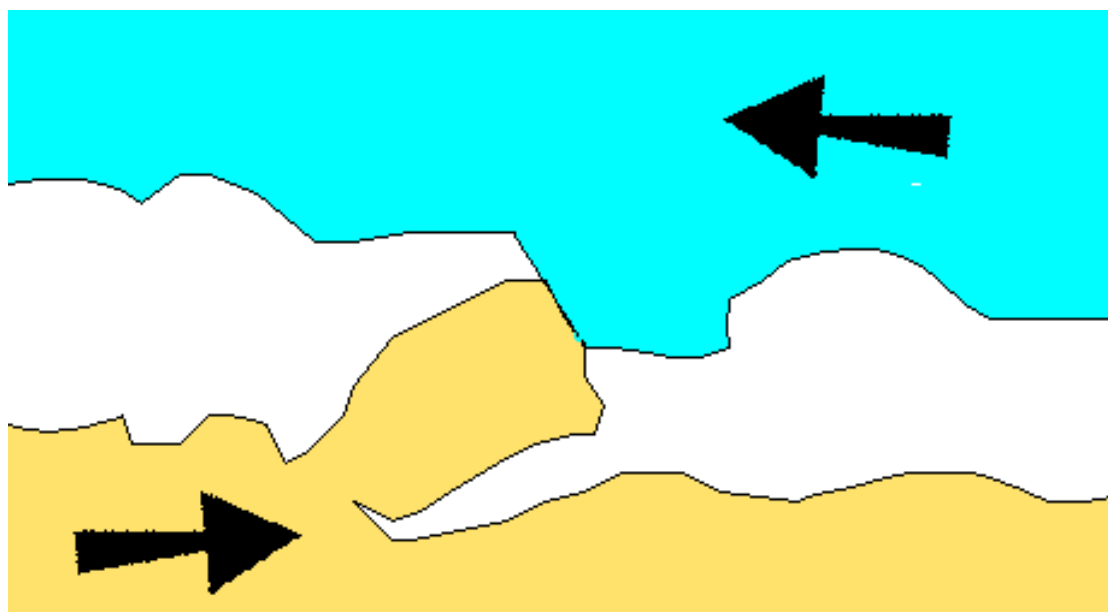
Kohdissa, joissa pinnat kohtaavat, materiaalien väliset reaktiot sekä mahdollisesti syntyvät rakenteelliset muutokset tapahtuvat stokastisesti. Näiden mikrokontaktien määrä on suoraan verrannollinen pintojen välillä vallitsevaan normaalivoimaan. [1, s. 100]

2.2 Abrasiivinen kuluminen

Abrasiivinen kuluminen on yleisesti ottaen materiaalin poistumista kappaleen pinnasta. Käytännössä se on kahden vastinpinnan ja mahdollisesti niiden välissä olevien partikkelien synnyttämää tai kappaleen pinnankarheuden huippujen aiheuttamaa naarmuuntumista. Abrasiivisesta kulumisesta voidaan käyttää myös nimitystä hiontakuluminen, joka kuvaa ilmiötä varsin hyvin.

2.2.1 Kahden kappaleen abrasiivinen kuluminen

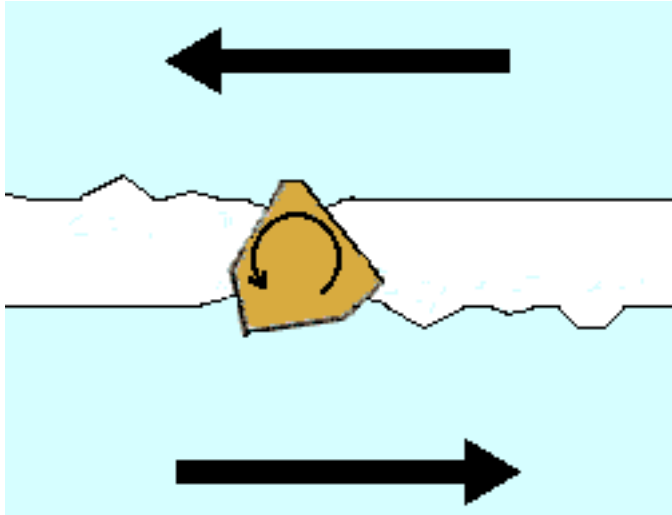
Kahden kappaleen abrasiivinen kuluminen tunnetaan englanniksi termillä two-body abrasive wear. Kuvassa 3 on tällaisesta tilanteesta kaavio. Siinä toisen materiaalin pinnanhuippu liikkuu tai raapiutuu vasten toista pintaa. Käytännössä tällaisissa tilanteissa kovempi kappale liukuessaan uurtaa pehmeämpää pintaa. [1, s. 109]



Kuva 3. Kahden kappaleen abrasiivinen kuluminen (two-body abrasive wear). [7]

2.2.2 Kolmen kappaleen abrasiivinen kuluminen

Kolmen kappaleen abrasiivinen kuluminen, englanniksi three-body abrasive wear, on vuorovaikutussuhde, jossa kahden pinnan ja niiden välissä olevan kovemman partikkelin tai kovempien partikkeleiden välillä tapahtuu muun muassa kyntämistä, leikkautumista ja pintojen lujittumista. Kahden pinnan välissä olevat kappaleet uurtavat molempia pintoja, ja siksi se on loogisesti nimetty kolmen kappaleen abrasiiviseksi kulumiseksi. Kolmen kappaleen abrasiivisen kulumisen toimintamekanismi on esitelty kuvassa 4 [1, s. 109]

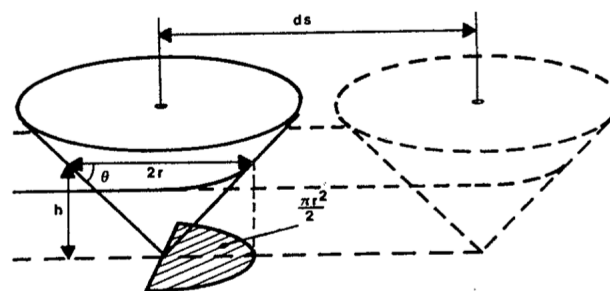


Kuva 4. Kolmen kappaleen kuluminen (*three-body abrasive wear*). [7]

Kahden- ja kolmen kappaleen kuluminen ei ole staattinen tila. Kahden kappaleen kulumisen voi hyvinkin helposti muuttua kolmen kappaleen kulumiseksi. Toisesta pinnasta irronnut ja muokkauslujittumisen johdosta kovettunut partikkeli jää hiertämään alkupe-
räisten vastakkain olleiden pintojen väliin. [1, s. 109]

2.2.3 Abrasiivisen kulumisen mekanismit

Abrasiivista kulumista voi käytännön sovelluksissa ilmetä kolmella eri tavalla. Tämä pitää paikkansa yhtäläillä sekä vastapintojen, eli kahden kappaleen tapauksessa, että kolmannen partikkelin materiaalia irrottavassa tilanteessa eli kolmen kappaleen kulumi-
sessa. Tällöin kulumismekanismeja on kolme eli kyntäminen, leikkautuminen ja hau-
raasti murtuminen. [1, s. 110] Kuvassa 5 on esimerkki kyntämisen tapauksesta.



Kuva 5. Kartiomainen uloke kyntää tasaista pehmeämpää pintaa.
[1, s.109]

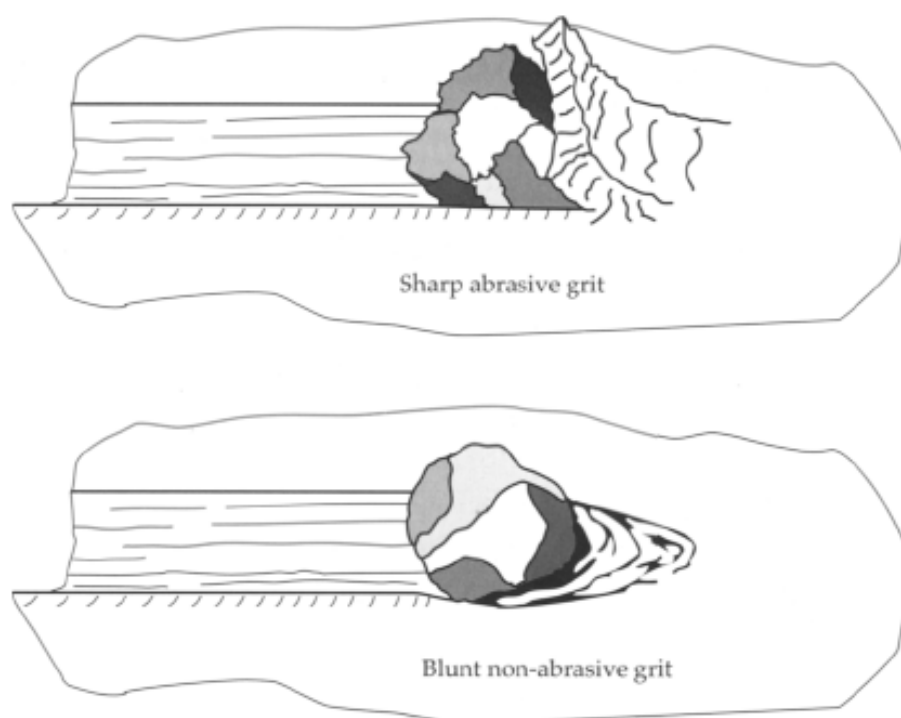
Kyntämisen tapauksessa materiaalissa oleva uloke tai irrallinen abrasiivi kovertaa uraa
pehmeämpään materiaaliin. Tämä muokkaa pehmeämpää pintaa ja plastisoi sitä. Plasti-

soituneesta materiaalista noin 60 – 90 % työntyy kynnetyn uran reunoille. Vastinpinnan huippujen jyrkkyys sekä kyntävän ulokkeen tai abrasiivin koko, muoto ja terävyys määrittävät syntyvän uran muodostusmekanismien. Materiaalissa olevien huippujen ollessa loivia mekanismi on enimmäkseen kyntämistä, kun taas jyrkillä huipuilla mekanismi on enimmäkseen leikkautumista. Urien muodostusmekanismit ovat yleensä näiden molempien yhdistelmiä. [1, s. 110]

Kulumispartikkelit voivat irrota hauraasti murtumalla, jos materiaali on riittävän haurasta. Erityisesti jäykät ja hauraat materiaalit toimivat näin, jos niitä kuormitetaan vielä iskumaisesti. Monesti jäykät (suuri kimmomoduli) materiaalit ovat myös hauraita. Tällaisissa erityistilanteissa materiaalin suurikaan kovuus ei pysty estämään murtumista, koska paikalliset jännityshuiput kasvavat valtaviksi. [1, s. 110]

2.2.4 Abrasiivipartikkelin muodon vaikutus kulumiseen

Minkä tahansa muotoinen abrasiivipartikkeli ei käytännön tilanteessa pysty hiomaan pintaa, toisin sanoen poistamaan materiaalia sen pinnasta. Abrasiivipartikkelin muodon vaikutusta ja niiden tekemiä jälkiä kulumispinnoissa on esitelty kuvassa 6. Siinä on esitettyä terävän ja tylpän abrasiivipartikkelin tapaukset ja niiden aiheuttamien urien erot. [5, s. 510]



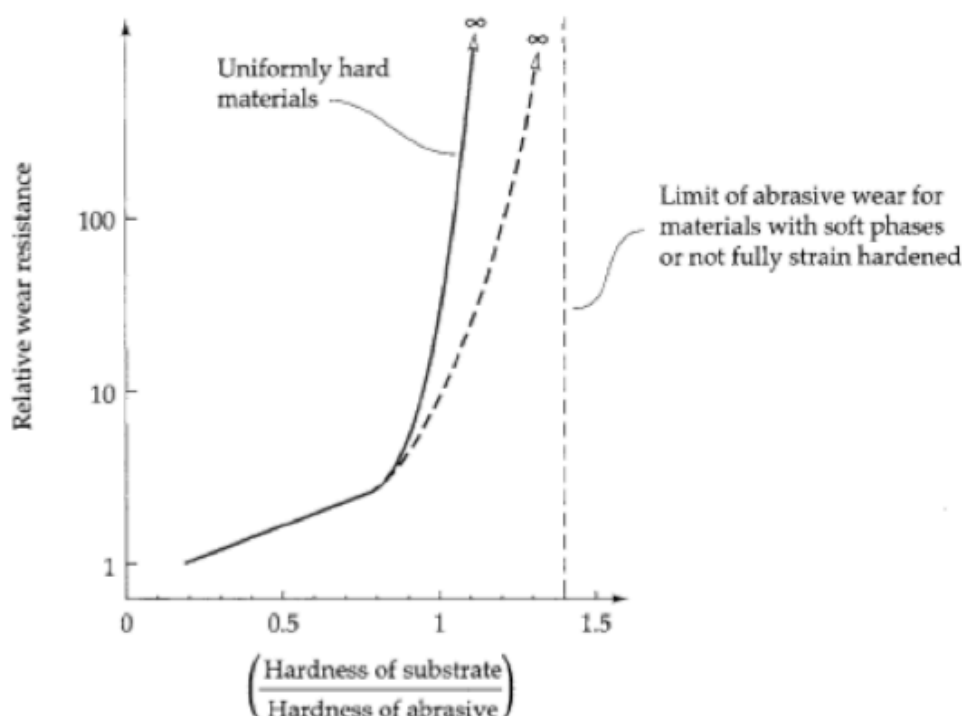
Kuva 6. Terävän ja tylpän partikkelin synnyttämä kulumisura. [5, s. 510]

Terävä abrasiivipartikkeli kyntää kappaleen pintaa ja poistaa materiaalia sen pinnasta. Kulumismekanismi on enemmän leikkaava. Abrasiivipartikkelin ollessa riittävän tylppä syntyvä uran kulumismekanismi on puolestaan enemmän kyntämistä. Tällöin tapahtuu materiaalin muodon muokkausta ilman kulumispartikkelien syntymistä. [5, s. 510]

2.2.5 Abrasiivipartikkelin kovuuden vaikutus kulumiseen

Partikkeli voidaan määritellä abrasiiviksi, jos se kykenee aiheuttamaan tehokasta ja nopeaa abrasiivista kulumista. Nopean abrasiivisen kulumisen tapauksissa on usein havaittu, että kulumisen materiaalin kovuus on alle 80 % abrasiivin kovuudesta. Rajallisen määrän vaurioitumista ja abrasiivista kulumista on kuitenkin huomattu syntyvän materiaalin pintaan (esim. laakeripinnoissa) myös, jos kulumisen materiaalin myötöraja ei ole abrasiivipartikkelin vastaavaa suurempi. Abrasiivinen kulumisen jatkuu hyvin hitaana niin kauan, kunnes kuluva materiaali saavuttaa muokkauslujittumalla saman kovuuden kuin mikä abrasiivipartikkelilla on. [5, s. 512]

Joillain pehmeillä faaseilla tai ei täysin muokkauslujittuneilla materiaaleilla voi esiintyä jonkin verran abrasiivista kulumista niin kauan, kunnes kulumisen materiaalin kovuus on saavuttanut jopa 120 % - 140 % abrasiivipartikkelin kovuudesta. [5, s. 512] Kuvassa 7 on esitetty materiaalin suhteellinen kulumiskestävyys sen ja abrasiivin kovuuden suhteen funktiona.



Kuva 7. Suhteellinen abrasiivisen kulumisen kesto substraatin ja abrasiivin kovuuden suhteen funktiona. [5, s. 513]

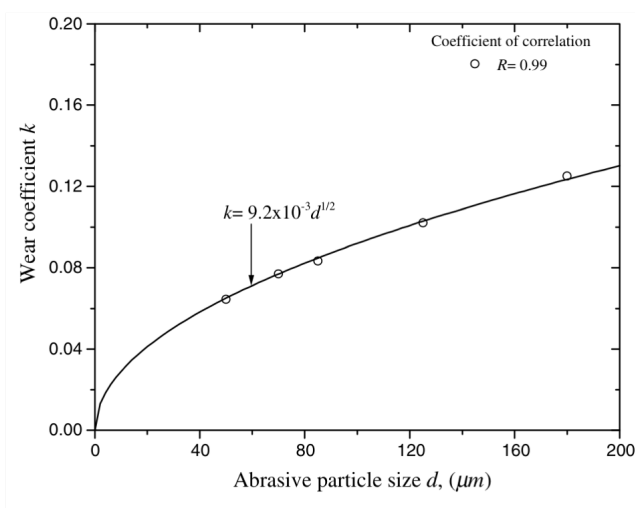
Kulumiskestävyys määritellään tavallisesti kulumisnopeuden käänteisarvoksi. Suhteellinen kulumiskestävyys on puolestaan määritelty kulumisnopeuden käänteisarvoksi, joka on jaettu kontrollimateriaalin kulumisnopeuden käänteisarvolla. [5, s. 513]

2.2.6 Abrasiivin partikkelikoon vaikutus kulumiseen

Abrasiivin partikkelikoolla, käytännön sovelluksissa monesti esiintyvien mineraalipartikkeleiden kokoluokalla, on myös oma vaikutuksensa kulumiseen ja kulumismekanismeihin. Seuraavaksi esitellään pintapuolisesti, miksi ja miten abrasiivin koko vaikuttaa terästen kulumiseen.

Abrasiivipartikkeleiden koon vaikutusta kulumiseen ovat tutkineet erityisesti Ibrahim Sevim ja Barlas Eryurek. He löysivät tutkimuksissaan vuorovaikutussuhteen abrasiivin koolle lämpökäsitellyillä ja lämpökäsittelemättömillä teräksillä ja johtivat tästä empiirisen kaavan abrasiivisen kulumisen ja partikkelikoon välille. [8, s. 175]

Perusolettamuksena tässä on, että abrasiivin koon kasvaessa kulumisvakio k kasvaa (yhtälö: $k = 9,2 \times 10^{-3} \sqrt{d^{1/2}}$, jossa d on abrasiivipartikkelin koko metreinä). Yksinkertaistettuna tämä tarkoittaa, että mitä isompaa partikkelikokoa abrasiivi on, sitä enemmän kulumista esiintyy. [8, s. 175] Kuva 8 esittää tätä riippuvuutta.



Kuva 8. Abrasiivin koon vaikutus kulumiskertoimeen. [5, s. 175]

Kulumismekanismit lämpökäsiteltyjen ja lämpökäsittelemättömien terästen välillä kuitenkin eroavat toisistaan. Teräksen lämpökäsittelyllä pyritään muuttamaan materiaalin kovuutta, jonka seurauksena hankaava partikkeli synnyttää enemmän lastuja mikroleikkautumis- ja mikromurtumismekanismien avulla. Kulumismekanismien ero edellä mainittujen teräslaatujen välillä johtuu lähinnä mikromurtumismekanismien roolin korostumisesta abrasiivisen kulumisen aikana. [8, s. 180]

Abrasiivipartikkelin koon ja teräksen kulumisen keston välillä havaitut vuorovaikutussuhteet riippuvat monesti siitä, millä mittarilla asiaa tarkastellaan. Jos tarkastelun kohteeksi otetaan edellä määritelty kulumisvakio k , lämpökäsittelimättömillä teräksillä voidaan havaita lineaarinen riippuvuussuhde abrasiivisen kulumisen keston ja kovuuden välillä. Kulumiskesto on kääntäen verrannollinen partikkelikoon neliöjuureen. Näin päädytään kuvan 8 mukaisesti kulumiskertoimen k ja abrasiivipartikkelin koon väliseen paraboliseen riippuvuussuhteeseen. [8, s. 176]

Kovuuden ja kulumisen keston välinen suhde on selkeämpi lämpökäsittelyillä teräksillä. Niillä myös partikkelikoko vaikuttaa selkeästi lineaarisemmin abrasiiviseen kulumiseen. Siksi ne sietävät heikommin abrasiivipartikkelikoon kasvun aiheuttamaa kulumista, kuin vastaavan kovuiset lämpökäsittelimättömät teräslaadut, johtuen edellä esitellyistä kulumismekanismien erilaisesta toiminnasta. [8, s. 180]

2.2.7 Teräksen mikrorakenteen vaikutus kulumisen keston

Erilaisilla terästen mikrorakenteilla voidaan vaikuttaa huomattavasti teräksen kulumiseen ja kulumisen keston. Seuraavaksi esitellään mikrorakenteen vaikutusta abrasiiviseen kulumiseen.

Abrasiivinen kuluminen tuottaa aina plastista muodonmuutosta kuluvaan materiaaliin. Kulumisen seurauksena materiaalissa tapahtuu useita rakenteellisia ja mikrorakenteellisia muutoksia. Pahimmassa tapauksessa tällaiset muutokset johtavat kuluvassa teräsmateriaalissa mikrorakenteen sirpaloitumiseen ja säröjen ydintymiseen. [9, s. 139]

Liukumaisessa abrasiivisessa kulumisessa plastisesta muokkautumisesta syntyneet rakenteelliset muutokset jopa lisäävät kulumista. Tällaisen muokkauslujittumisen kääntöpuoli onkin kulumisen keston alentuminen isku-abrasiivisessa kuormituksessa. [9, s. 140]

Voidaankin siis sanoa varmasti, että teräksen mikrorakenne ja dislokaatioteorian mukainen lujittuminen sanelevat teräksen mekaaniset ominaisuudet, kuten kovuuden, lujuuden ja sitkeyden. Kulumisen luonnetta säätelevät abrasiivisen kulumisen tapauksessa myös abrasiivipartikkelin dimensiot, Matriisiin ja siinä esiintyviin kovempiin faaseihin ja karbideihin syntyneiden urien syvyydet sekä abrasiivin mekaaniset ominaisuudet ja/tai mikrorakenne.

Kaksifaasiteräksissä kulumisen keston vaikuttavat lähinnä raekoko ja martensiitin määrä. [10, s. 497] Tämä on merkittävä asia koskien vaikkapa muokkauslujittuvia duplex-teräksiä.

Samansuuntaisia tuloksia on saatu muissakin tutkimuksissa. Lähtökohtaisesti voidaan todeta martensiittisen mikrorakenteen vastustavan erittäin hyvin abrasiivista kulumista. Asiaa siis vahvasti yksinkertaistamalla voidaan todeta, että mitä kovempaa metallia on, sen paremmin se kykenee vastustamaan abrasiivista kulumista. [11, s. 67]

2.2.8 Lämpötilan vaikutus abrasiiviseen kulumiseen

Lämpötilan vaikutus abrasiivisessa kulumisessa voidaan jakaa seuraavasti kahteen pääkategoriaan: vallitsevan lämpötilan vaikutus kulumiseen ja abrasiivipartikkelien aiheuttama plastisesta muodonmuutoksesta johtuva lämpötilan nousu kuluvaan materiaaliin. [5, s. 525]

Edellä mainittujen lämpötilannousujen vaikutukset kuluvaan materiaaliin eivät ole samanlaisia. Abrasiivista kulumista korotetussa lämpötilassa on tutkittu suhteellisen vähän, johtuen osittain hankalista koejärjestelyistä. Joitain abrasiivisen kulumisen kokeita on tehty kuparilla ja alumiinilla. Kuparilla kulumisen kasvoi hivenen lämpötilan noustessa aina 400 °C:seen asti, kun taas alumiinilla ei havaittu eroa kulumisen kestossa. Lämpötilan noustessa vastaavasti abrasiivin ja kuluvan materiaalin kovuus laskee. Tämä trendi todennettiin kokeissa, joita suoritettiin aina 2000 °C:n lämpötilaan asti, joissa valtaosalla tutkituista metalleista oli samat ominaisuudet. Niiden kovuus laski keskenään samassa suhteessa lämpötilan noustessa korkeammaksi. Kokeissa kävi ilmi, että kun lämpötila lähestyi 80:tä % sulamispisteestä, suurimmalla osalla materiaaleista kovuuden alenema oli tässä vaiheessa merkityksetön kulumisen kestoon nähden, vaikka ei-metalliset mineraalit, kuten piinitridi ja piikarbidit, säilyttivät kovuutensa hyvin lähellä sulamispistettään. [5, s. 525]

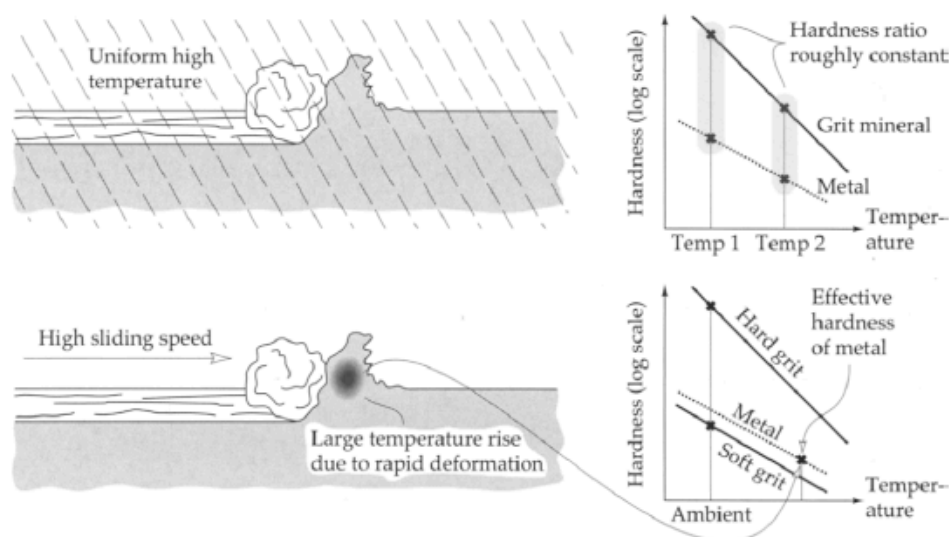
Pohdittaessa teräksen abrasiivista kulumista, kun abrasiivina toimii piidioksidi (kvartsi) ja alumiinioksidi (alumina), täytyy materiaalien sulamispisteet ottaa huomioon. Sulamispiste on teräksellä noin 1500 °C, kvartsilla 1710 °C ja aluminalla 2045 °C. Lämpötilan noustessa abrasiivin kovuus suhteessa teräksen kovuuteen kasvaa nopeammin alumiinioksidilla kuin kvartsilla. Tämän vuoksi alumiinioksidi aiheuttaa todennäköisemmin enemmän vakavaa kulumista kuin kvartsi. [5, s. 525-526]

Plastisen muodonmuutoksen seurauksena syntyvä lämpötilan kasvu yhdistetään usein nopeavauhtisiin hioviin partikkeleihin. Dynaamisella termoelementillä mitattaessa sähköä johtavissa abrasiivipartikkeleissa on havaittu jopa yli 1000 °C:n lämpötiloja abrasiivisen kulumisen aikana. [5, s. 526]

Kriittinen ero ympäristön lämpötilannousun ja abrasiivisen kulumisen aiheuttaman lämpötilan välillä on se, että abrasiivipartikkelit pysyvät suhteellisen viileinä johtuen abraasion muutosluonteesta. Abrasiivipartikkelin ja pinnan kontakti on erityisen lyhytaikainen kolmen kappaleen (three-body) systeemin tapauksessa, jolloin kaikki muokkau-

tuneesta materiaalista syntynyt lämpö ei diffusoidu hiovaan partikkeliin. On siis mahdollista, että muodonmuutoksesta johtuvasta lämpötilan noususta seuraava pehmentyminen ilmenee vain muokkautuvassa materiaalissa abrasiivipartikkelin kovuuden pysyessä käytännössä muuttumattomana. Tämä nopeavauhtisen abraasiivisen kulumisen aiheuttama paikallinen lämpötilannousun kohdentuminen on esitetty kuvassa 9. [5, s.526]

Kun hiova partikkeli siis pysyy suhteellisen viileänä abraasiotapahtuman ajan, säilyttää se myös kovuutensa, vaikka kuluva materiaali pehmenisi voimakkaasti. Tämän johdosta suurilla nopeuksilla jopa verrattain pehmeät mineraalit alkavat merkittävästi kuluttaa alun perin koviakin materiaaleja. Esimerkki tällaisesta ilmiöstä on terästä kuluttava kovista epäpuhtauksista vapaa hiili. Nopeudesta riippuva pehmentymisefekti pienenee korkeissa lämpötiloissa, koska ympäröivän lämpötilan vaikutus pehmentää materiaalia jo merkittävästi ja paikallisen muodonmuutoksen synnyttämän lämpötilan nousun suhteellinen osuus pienenee. [5, s.526]



Kuva 9. Lämpötilan vaikutus abraasioon erilaisissa olosuhteissa. [5, s. 526]

Korkea lämpötila aiheuttaa myös erityistyyppistä abrasiivista kulumista, joka on yhdistelmä hapettumista ja oksidoituneen pinnan irtoamista. Teräksen oksidoituminen voi olla huomattavan nopeaa esim. 600 °C:ssa, ja lämpötilan noustessa oksidipinnan irtoaminen nousee yhä merkittävämpään asemaan. [5, s. 525].

2.2.9 Kosteuden vaikutus abrasiiviseen kulumiseen

Kosteudella on voimakas vaikutus abrasiivisen kulumisen nopeuteen. Yleensä kulumisnopeus kasvaa ympäristön kosteuden lisääntyessä, mutta on myös olemassa tilanteita, joissa käy päinvastoin. Kosteuden vaikutuksen ennustaminen mille tahansa yksittäiselle tilanteelle on vaikeaa. Hiova partikkeli voi olla juuri sopivasti kosteuden heikentämä, jolloin se tuottaa suuren määrän uusia leikkaavia särmiä. Toisaalta merkittävän lujuuden heikentymisen seurauksena hiovat partikkelit saattavat hajota tuottaen ei-abrasiivista jauhoa. Myös kuluva materiaali saattaa pehmetä kosteudesta (esim. lasi). [5, s. 525]

Samalle abrasiiville ja kuluvalle materiaalille kahden kappaleen (two-body-wear) kulumisen tapauksessa kulumisnopeus saattaa joko kasvaa tai laskea. Kuvassa 10 on yhteenveto veden ja kosteuden vaikutuksista eräiden materiaalien kulumiseen. Veden myötä abrasiiviseen kulumisjärjestelmään voi myös päästä korrodoivia aineita (esim. laimeita happoja). Tästä seuraa korrodoivaa abrasiivista kulumista, jolla on samankaltaisuuksia hapettavan korrodoivan kulumisen kanssa. Ei-vesipohjaiset nesteet, kuten eräät liukastusaineet, voivat myös vaikuttaa abrasiiviseen kulumiseen. Käytettäessä steariinihappoa liukasteena kolmen kappaleen systeemissä (three-body-wear) kovemman metallipinnan abraasio kasvaa. Ilmiön aiheuttava mekanismi saattaa olla se, että abrasiivi mieluusti uppoaa pehmeämpään materiaaliin ja kuluttaa sitten kovempaa materiaalia mikroleikkautumalla voitelun ollessa riittävän tehokasta. Jos voitelua ei ole, vallitseva kulumismekanismi on hitaampi kyntämistyyppinen abraasio. [5, s. 525 - 526]

Material and wear conditions		Percentage change with respect to 'dry' wear		
		50% RH	100% RH	Wet
Aluminium alloy 6063-T6:	Fixed SiC abrasive	+ 20	+ 10	- 10
1040 steel, pearlitic:	Fixed SiC abrasive	+ 5	+ 10	0
	Loose SiC abrasive, 3-body	+ 20	+ 175	
Pyrex glass:	Fixed SiC abrasive	+ 15	+ 30	0
	Loose SiC abrasive, 3-body	- 12	+ 220	
Sintered alumina:	Fixed SiC abrasive			- 99
	Loose Al ₂ O ₃ abrasive, 2-body			+ 300
WC/6-10%Co:	Loose Al ₂ O ₃ abrasive, 2-body			+ 54
	Cutting sandstone			- 36
Flexible PVC:	Loose SiO ₂ abrasive, 2-body			+ 200
Nylon (polyamide) 6.6:	Loose SiO ₂ abrasive, 2-body			- 58

Kuva 10. Yhteenveto veden ja kosteuden vaikutuksista eräiden materiaalien kulumiseen. [5, s. 526]

2.2.10 Abrasiivisen kulumisen hallinta

Abrasiivinen kuluminen on nopein kulumisen muoto, ja se aiheuttaa teollisuudelle suurimmat kustannukset. Siksi onkin kehitelty muutamia menetelmiä tappioiden kurissa pitämiseksi. Yksinkertaisin tapa abrasiivisen kulumisen hallitsemiseksi tai lopettamiseksi on nostaa kuluvan pinnan kovuus 80 %:iin hiovan partikkelin kovuudesta. Millään muulla kulumistyyppillä ei ole periaatteessa näin yksinkertaista ehkäisykeinoa. Toki kovuuden kasvattamisessa on omat haasteensa, koska materiaalin hauraus yleensä lisääntyy kovuuden kasvun myötä. Materiaalin sitkeyden säilyttäminen on toki jossain määrin mahdollista, mutta se on haastavaa. [5, s. 526]

Abrasiivista kulumista hallitaan yleensä kovien materiaalien tai kovien pinnoitteiden käytöllä. Suurin osa kovista materiaaleista maksaa kuitenkin yleisesti käytettyjä materiaaleja enemmän. Siksi ensimmäiseksi täytyy kyetä vastaamaan kysymykseen; minkä luonteinen abrasiivista kulumista aiheuttanut ongelma on? Jos tavoitteena on saada kuluva komponentti kestävämpään karkkeaa kulutusta (esim. kengänpohjat), silloin abrasiivista kulutusta kestävämpää materiaalinvalintaa sanelee vaihtoehtoisen materiaalin hinta. Teollisissa koneissa pienikin määrä abrasiivista kulumista voi vaikuttaa erittäin haitallisesti laitteiston kokonaistoimintaan. Abrasiivisesta kulumisesta johtuvan suorituskyvyn aleneman määrittäminen tai mittaaminen voi usein olla mahdotonta tai vaatia hyvin yksityiskohtaista testaamista. [5, s. 526].

Esimerkki tällaisesta ongelmasta on sokeriruo'ossa olevasta piidioksidista johtuva soke-
riruokosilppureiden vasaroiden asteittainen kuluminen. Sokeriruokomyllyissä oli havaittu pienen määrän kulumista pyöristävän vasaroita ja estävän näin sokeriruo'on kunnollisen silppuamisen. Jotta sokeriruo'osta saataisiin sokeria, ruoko on ensin silputtava ja tämän jälkeen murskattava. Toisin sanoen, vasaroiden kuluminen aiheutti sokerimyllyille tappiota erotellun sokerin saannissa. Kulumisongelma ratkaistiin korvaamalla taotut teräsvasarat volframikarbidilla. Koska volframikarbidin kovuus on noin 1100 VHN (tai 11 GPa), se kykeni menestyksekkäästi vastustamaan abrasiivista kulumista itseään kovempia piikarbideja vastaan, joiden kovuus on noin 1150 VHN (11,5 GPa). Sokeriruokosilppurivasaroiden pidentynyt huoltoväli ja ruo'on valmistuksen parantunut laatu oikeuttivat arvokkaampien volframikarbidikomponenttien käytön, jotka olivat viisi kertaa teräksisiä kalliimpia. Täytyy kuitenkin mainita, että volframikarbidivasaroiden käyttö aiheutti myös tarpeen magneettisille separaattoreille. Sokeriruokojen mukana prosessiin kulkeutuu rautaa, joka on peräisin kuluneista ruokojen leikkaamiseen käytetyistä veitsistä ja muusta rautaroskasta, joita sokeriruokojen kerääjiltä jää ruokoihin. Ennen separaattorien käyttöönottoa volframikarbidivasara meni sirpaleiksi osuessaan ensimmäiseen sisään tulevaan metalliroskaan tehden vasaroiden eliniän ennusteen kovin lyhyeksi. [5, s. 526 - 527]

Kovat pinnoitteet kasvattavat kaiken aikaa suosiotaan, koska ne tarjoavat käyttökelpoisen tavan taistelussa abrasiivista kulumista vastaan. Minkä tahansa teräskomponentin voi periaatteessa päällystää ohuella mutta kulutusta kestäväällä kerroksella. Tämä mahdollistaa taloudellisen ja tehokkaan keinon käyttää arvokkaita materiaaleja. Kulutusta kestävien komponenttien valmistus myös helpottuu, koska volframikarbidia on hankala koneistaa ja hitsata. Sillä on myös muita ei-toivottuja ominaisuuksia, kuten hauraus (esim. ne saattavat mennä sirpaleiksi iskumaisesta kuormituksesta). [5, s. 527]

2.3 Eroosiokuluminen

Kivioja et al. mukaan: "Eroosiokuluminen on käytännössä kulumista, jossa kiinteiden tai nestemäisten partikkelien törmäysten seurauksena poistuu ainetta pintakerroksista." [1, s. 119] Tuossa lauseessa on esitelty eroosiokuluminen yksinkertaisesti ja elegantisti. Eroosiokuluminen on toki monimutkainen prosessi, ja monet eri tekijät vaikuttavat siihen hyvinkin voimakkaasti.

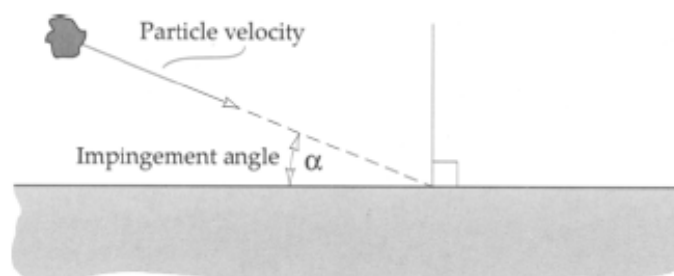
Eroosiokuluminen on siis seurausta kiinteiden tai nestemäisten partikkelien iskeytymisestä kappaleen pintaan. Tällaista kulumista esiintyy monenlaisissa koneissa. Tyypillisiä esimerkkejä ovat kaasuturbiinien lavat lentokoneen lentäessä pölypilvien läpi sekä siipipyörien kuluminen mineraalien jalostuslaitteistoissa. Yhteistä muiden kulumistyyppien kanssa on se, että pelkkä materiaalin kovuus ei takaa kulumisen kestoa eroosiokulumistilanteissa. Kulumisen minimoimiseksi onkin tehtävä yksityiskohtainen analyysi kuluvan materiaalin luonteesta. Eroosiota aiheuttavien partikkelien ominaisuudet ovat myös hyvin merkittävät, ja tutkijoiden mielestä partikkelit ovatkin yksi erittäin keskeinen parametri tämän tyyppisessä kulumisessa. [5, s. 527]

2.3.1 Eroosiokulumismekanismit

Eroosiokuluminen käsittää muutamia kulumismekanismeja, joita pääsääntöisesti hallitsevat eroosiota aiheuttavan partikkelin materiaali, iskeytymiskulma, iskeytymisnopeus ja partikkelin koko. Partikkelin ollessa kiinteä ja kova kulumismekanismi saattaa olla samankaltainen abrasiivisen kulumisen kanssa. Eroosiota aiheuttavien partikkelien ollessa nestemäisiä abraasio ei ole päällimmäisenä, vaan kulumismekanismi koostuu toistuvista iskeytymisistä aiheutuvasta rasituksesta. [5, s. 527]

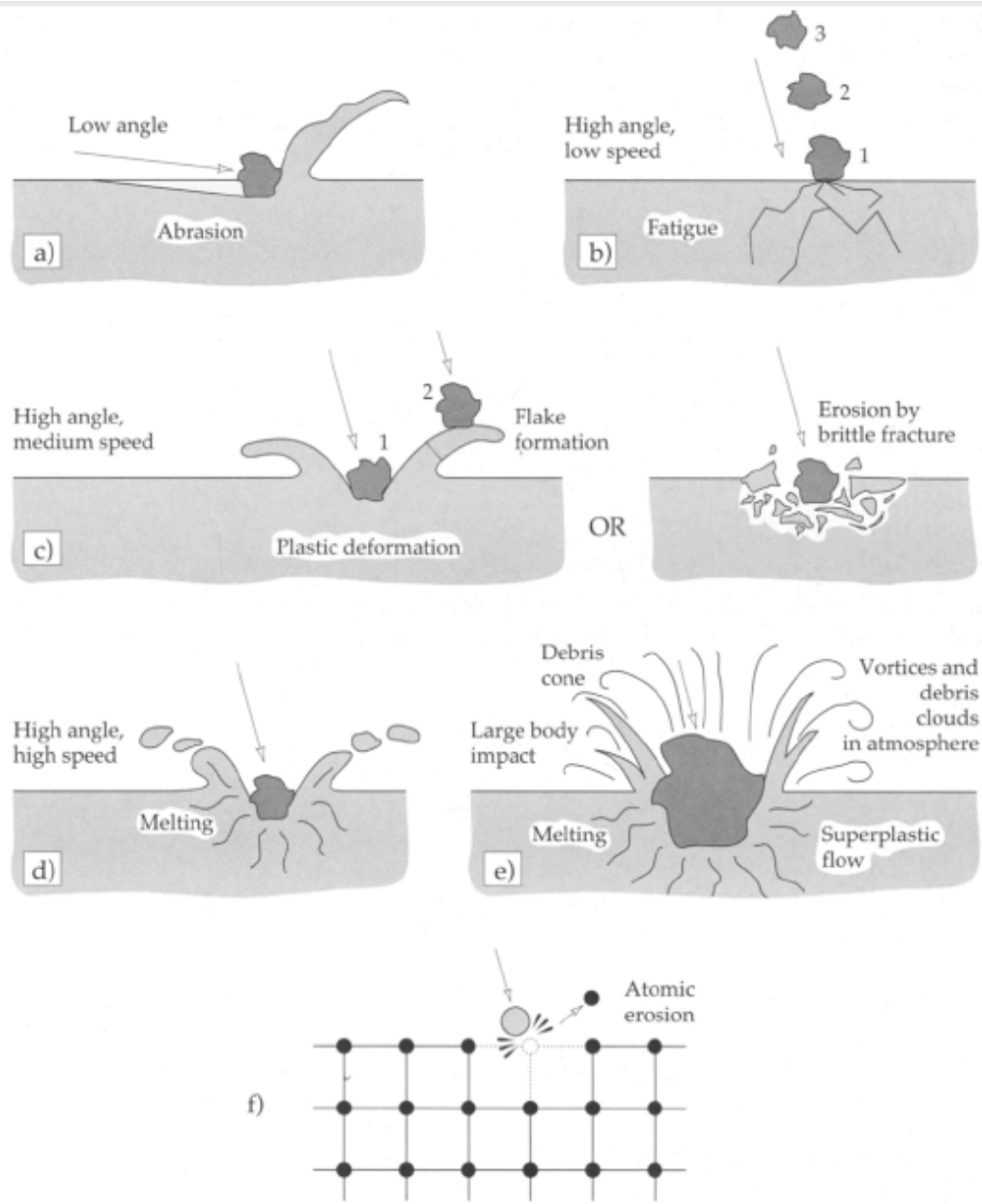
Iskeytymiskulma on eroosiota kokevan pinnan ja partikkelin lentoradan välinen kulma juuri ennen iskeytymistä, kuten kuvasta 11 käy ilmi. Pieni iskeytymiskulma suosii abrasiivisen kulumisen kanssa samantyylistä kulumisprosessia, koska partikkeleilla on tapana kulkea kuluvan pinnan poikki iskeytymisen jälkeen. Suuren kulman iskeytyminen aiheuttaa erilaisia kulumismekanismeja, jotka yhdistetään tyypillisesti eroosiokulumiseen. Termi "eroosiokuluminen" viittaa määrittelemättömään määrään

seen. Termi "eroosiokuluminen" viittaa määrittelemättömään määrään kulumismekanismia, joita tavataan suhteellisten pienten partikkelien iskeytyessä mekaanisia komponentteja vasten. Tämä määritelmä on luonteeltaan empiirinen ja juontaa juurensa ennemminkin käytännön tilanteisiin kuin perusteelliseen ymmärrykseen kulumisesta. Eroosiokulumisen yleisimmät mekanismit on esitelty kuvassa 12. [5, s. 527]



Kuva 11. Partikkelin iskeytymiskulman esittely. [5, s. 529]

Eroosiota aiheuttavan partikkelin nopeudella on erittäin suuri vaikutus kulumisprosessiin. Nopeuden ollessa hyvin alhainen iskun aiheuttamat rasitukset ovat riittämättömiä synnyttämään plastista muodonmuutosta ja kuluminen tapahtuu pinnan väsymisen kautta. Nopeuden kasvaessa esimerkiksi kahteenkymmeneen metriin per sekunti kuluva materiaali saattaa jo muokkautua plastisesti iskeytymisen voimasta. Tällaisissa tilanteissa, jotka ovat hyvin yleisiä monille komponenteille, kuluminen tapahtuu toistuvien plastisten muodonmuutosten kautta. Eroosiota aiheuttavien partikkelien ollessa tylppiä tai pyöreähköjä kuluvan materiaalin pintaan syntyy voimakkaan plastisen muodonmuutoksen seurauksena ohut lamellimainen kerros. Partikkelien ollessa teräviä kulumismekanismi on todennäköisimmin leikkautuminen tai hauras sirpaloituminen (fragmenting). Hauraat materiaalit kuluvat taas yleensä pinnan alaisten murtumien kautta. Hyvin suurilla eroosiopartikkelien nopeuksilla kuluva pinta saattaa jopa sulaa iskujen voimasta. Partikkelikoko on myös hyvin merkittävä vaikutus, ja suurimman osan eroosiokulumisesta aiheuttavat partikkelit ovatkin halkaisijaltaan $5\ \mu\text{m}$ - $500\ \mu\text{m}$, vaikka ei ole olemassa mitään perimmäistä syytä, miksi eroosiota aiheuttavat partikkelit pitäisi rajata tähän kokoluokkaan. [5, s. 527]



Kuva 12. Eroosiokulumismekanismien esittelyä: a) abraasio pienellä iskeytymiskulmalla, b) pinnan väsyminen pienillä nopeuksilla ja suurilla iskeytymiskulmilla, c) hauras murtuminen tai toistuvat plastiset muodonmuutokset, suuri iskeytymiskulma, d) pinnan sulaminen suurilla iskeytymisnopeuksilla, e) makroskooppinen eroosio sekundäärisillä vaikutuksilla, f) kidehilan muutokset atomien iskeytymisestä. [5, s. 528]

Matalan kiertoradan satelliitti (low earth orbit, LEO) tarjoaa hyvän esimerkin hyvin pienten partikkelien eroosiokulumisesta, sillä satelliitti altistuu eroosiokulumiselle siihen törmäävien happi- ja typpiatomien vaikutuksesta. Tämä johtaa lopulta satelliitin suojaavan päällystyskerroksen rappeutumiseen. Avaruudessa on myös lukematon määrä meteoriitteja, jotka kuormittavat kaikkia eteen osuvia asteroideja tai kuita. Kuten satelliitin pintamateriaalin kulumisen ja planetaarisen meteoriittien pommituksen tapauksessa,

eroosiota aiheuttavien partikkelien törmäysnopeudet ovat hyvin suuria ja spesifinen kulumismekanismi on toisenlainen kuin mitä tavallisesti ymmärretään eroosiokulumisella. Törmätessään ilmakehän atomeihin pommituksen kohteeksi joutuva kidehila kokee muutoksia rakenteessaan. Meteoriittien tekemässä eroosiossa suuri koko ja suuri nopeus aiheuttavat puolestaan makroskooppista tuhoa prosessissa, jossa sellaiset vaikutukset kuten ilmakehän pyörteily iskeytymiskohdan ympärillä ovat jo huomattavia. [5, s. 527 - 528]

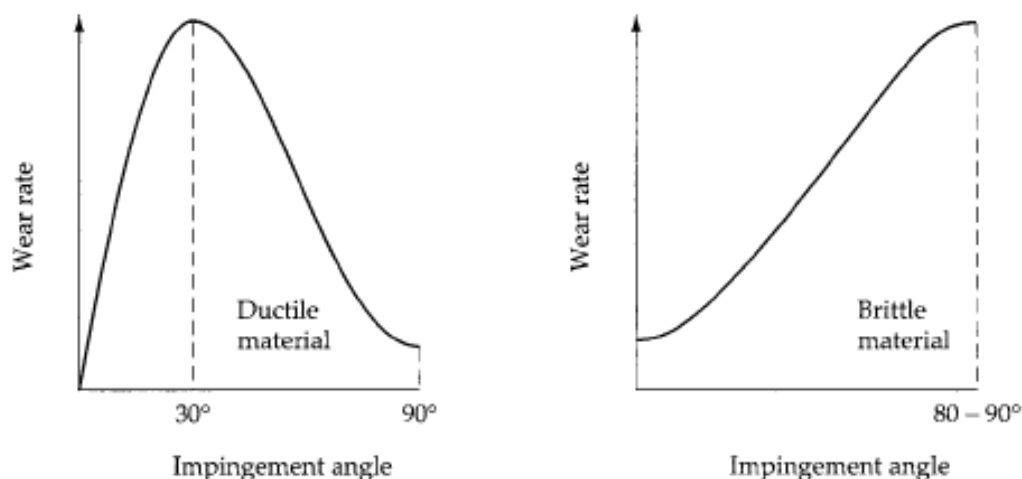
Eroosiomekanismit voidaan karkeasti jakaa kahteen pääryhmään: sitkeään eroosioon ja hauraaseen eroosioon. Suurin ero näiden eroosiomekanismien välillä käy selväksi vertaillaessa eroosionopeuksia eri iskeytymiskulmilla. Sitkeän eroosion tapauksessa kulu- van materiaalin suurin eroosionopeus saavutetaan yleensä noin 30° :n iskeytymiskulmal- la. Hauraiden materiaalien tapauksessa huippu saavutetaan yleensä 90° :n iskeytymis- kulmilla. Pehmeiden ja sitkeiden materiaalien eroosio on pääsääntöisesti sitkeää ja ma- teriaalihäviö saattaa ilmetä kahdella eri tavalla, leikkautumalla matalan iskukulman ta- pauksissa sekä suurten iskeytymiskulmien kohdalla ekstruusion kautta. Törmäävien partikkelien sirpaloitumista saattaa tapahtua iskukulmien ollessa 90° tai hieman sen alle, mikä taas mahdollistaa sekundäärisen eroosion. Nämä kaksi mekanismia eivät ole toisiaan poissulkevia, ja sitkeän materiaalin eroosio on pohjimmiltaan yhdistelmä näistä kahdesta prosessista, joista toinen on dominoivassa asemassa toiseen nähden riippuen iskeytymiskulmasta, materiaalin ominaisuuksista sekä partikkelin ominaisuuksista ja muodoista. Saatavilla on monia tutkimuksia, joissa käsitellään muokkautuvien materiaa- lien kulumisnopeuksien laskentaa sekä mallintamista. Tunnetuimpia näistä ovat mm. I. Finnie 1960, G.P. Tilly 1973 ja A.V. Levy 1986. [12, s. 12-13 - 12-14]

Kiinteiden partikkeleiden aiheuttama materiaalihäviö tapahtuu pääsääntöisesti mik- rosäröverkoston muodostumisen ja interaktioiden kautta. Tällaisen säröilyn syntyminen vaatii pintajännityksen kasvamista kriittiseen rajaan asti, mikä aloittaa mikrosäröilyn. Materiaalihäviö syntyy tällaisten säröjen edetessä ja kohdatessa pinnan. Siksi hauraila materiaaleilla eroosiokulumisen kesto onkin funktio murtolujuuden (fracture toughness) ja säröilyn käynnistymiseen vastustuskyvyn välillä. Muokkautumis- ja säröilytyyppiin vaikuttavat partikkelien nopeus, muoto ja sen mekaaniset ominaisuudet verrattuna koh- demateriaaliin. Hitaat ja tylpät partikkelit aiheuttavat Hertzin jännityskentän osuessaan kohteeseen, mikä käynnistää kartiosäröilyä, kun taas kulmikkaat ja nopeat partikkelit tuottavat ei-elastisia muodonmuutosalueita sekä käynnistävät mediaanista ja lateraalista säröilyä. [12, s.12-14]

2.3.2 Partikkelin iskeytymiskulma ja iskeytymisnopeus

Partikkelien iskeytymiskulmat voivat vaihdella välillä 0° - 90° . Iskeytymiskulman ol- lessa nolla kulumisen on olematonta, koska partikkelit eivät törmää kulu- van materiaalin pintaan. Kuitenkin vielä aika pienellä 20° :n iskeytymiskulmalla kulumisen voi olla hy-

vinkin rajua, jos partikkelit ovat kovia ja pinta pehmeää. Kuluminen muistuttaa tällöin abrasiivista kulumista. Jos pinta on hauras, pinta voi kulua rajusti sirpaloitumalla saatuttaen kulumishuippunsa iskeytymiskulman lähestyessä 90°:ta. Kuvassa 13 on esitetty kulumisnopeuden ja iskeytymiskulman vuorovaikutuksia sitkeillä ja hauraille materiaaleilla. [5, s. 529]



Kuva 13. Iskeytymiskulman vaikutus sitkeillä ja hauraille materiaaleilla. [5, s. 529]

Eroosiokulumisnopeuden maksimin ollessa matalalla iskeytymiskulmilla vallalla on sitkeäntyyppin eroosiokulumiskäyttäytyminen. Vastavuoroisesti jos kulumismaksimi asettuu suurille iskeytymiskulmille, eroosiokuluminen on hauraan tyyppin kulumista. Iskeytymisnopeudella on erittäin suuri merkitys kulumisnopeuteen. Yleensä on myös havaittavissa jonkinlainen kynnysnopeus, jonka alapuolella kuluminen on merkityksetöntä vähäistä. Kulumista käytännön sovelluksissa keskisuurilla ja suurilla partikkeli-nopeuksilla voidaan kuvata potenssilaila (power law). [5, s. 529]

$$-dm / dt = kv^n \quad (1)$$

- m** kuluneen näytteen massa (negatiivinen, koska kuluminen aiheuttaa materiaalihäviötä) [kg];
- t** prosessin kesto [s];
- k** empiirinen vakio;
- v** iskeytymisnopeus [m/s];
- n** nopeuden eksponentti.

Eksponentin n arvo vaihtelee kiinteillä partikkeleilla yleensä välillä 2 - 3, mikä on hie-
man enemmän, mitä arviot partikkelien kineettisen energian pohjalta antaisivat olettaa.
Kaava 1 ei ole kattava, sillä k :n arvoa määrittelevät muut parametrit, kuten partikkelin
tiheys ja muoto, joita varten ei ole vielä olemassa analyttistä dataa. Tämä on kuitenkin

yksi yleisistä kaavoista, jota on käytetty esittämään iskeytymisnopeuden vaikutusta kulumisnopeuteen. Esimerkiksi partikkelinopeuden kasvaessa kymmenkertaiseksi kulumisnopeus voi kasvaa sata- tai jopa tuhatkertaiseksi.

[5. s, 530]

Partikkelin törmäysnopeudella on voimakkain vaikutus eroosion määrään, ja voidaankin sanoa, että eroosiomäärä on suhteessa eroosiota aiheuttavien partikkelien kineettiseen energiaan. Tästä seuraa, että eroosiomäärä (ϵ) esitetään yleensä suhteessa iskeytyvien partikkelien nopeuden (v) neliöön. [12, s, 11-4]

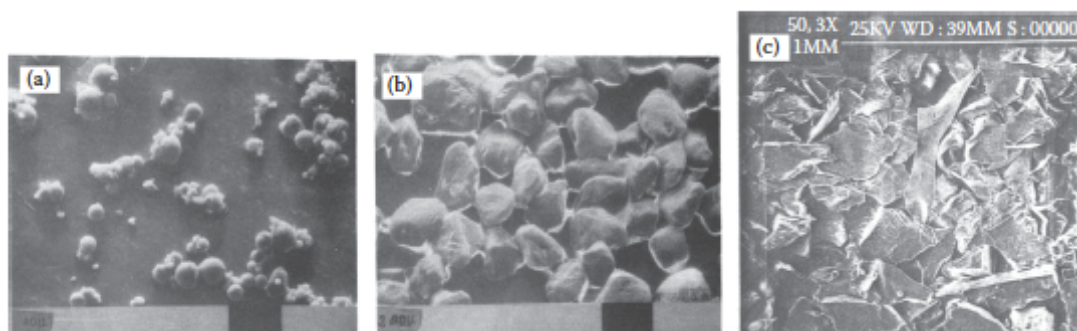
$$\epsilon = v^n \quad (2)$$

Kokeelliset tulokset kuitenkin viittaavat siihen, että nopeuden eksponentti (n) eroosiomäärä yhtälössä vaihtelee huomattavasti riippuen kohdemateriaalista ja lämpötilasta. Lisäksi nopeuden eksponentti (n) riippuu myös iskeytymiskulmasta. Eri materiaaleille on mitattu eksponentin n arvoja välillä 0,68 - 4. [13]

Eroosiokulumisnopeuden ja iskeytymiskulman välinen suhde sitkeillä ja haurailta materiaaleilla on lähtökohtaisesti erilainen. Tämä johtuu pääsääntöisesti erilaisista mekanismeista leikkautumiselle ja haurasmurtumiselle. Hauraan materiaalin eroosiomäärä kasvaa jatkuvasti iskeytymiskulman kasvaessa ja saavuttaa huippunsa kulman kasvaessa 90°:een. Sitkeillä materiaaleilla eroosiomäärä kasvaa ensi alkuun ja saavuttaa huippunsa iskeytymiskulman ollessa, riippuen materiaalin ominaisuuksista, 20°:n - 35°:n välillä. Tämän jälkeen se alkaa vähentyä ja saavuttaa jäännösarvon iskeytymiskulman ollessa 90°. Polymeerimatriisilla vahvistetuilla komposiittimateriaaleilla eroosiokäyttäytyminen on kvasi-sitkeää. Niiden maksimi eroosiomäärä tavataan alle 90°:n kulmilla mutta kuitenkin suuremmilla, kuin puhtaasti sitkeiden materiaalien iskeytymiskulmilla. [14]

2.3.3 Partikkelin kovuus, muoto ja mineraalikoostumus

Eroosiokulumisnopeuteen vaikuttavat myös partikkelien koostumus ja muoto. Kuvassa 14 esitellään elektronimikroskoopilla otettuja kuvia lentotuhkasta (fly ash), piidioksidi-hiekasta ja alumiinioksidipartikkeleista. Viimeisin näistä on kaikkein eniten eroosiokulumista aiheuttava, koska siinä on kulmikkaita muotoja ja erittäin teräviä kulmia. Kvartsi on (hiekkä)pölyn yleisin ainesosa, mutta sen koostumus ja kokojakauma voi vaihdella alueittain. Koska kvartsi on yksi kovimmista ainesosista, lisäys kvartsinmäärässä johtaa huomattavaan eroosiomäärän kasvuun. Siksi maassa tapahtuva yleinen abraasio partikkelien välillä pienentää pehmeämpien ainesosien kokoa. Goodwin et al. (1969) huomasivat myös tutkimuksissaan, että kovimmat pölyhiukkaset olivat yleensä myös profiililtaan terävimpiä. [12. s. 11-6]



Kuva 14. Elektronimikroskoopilla otettuja kuvia, a) 100 μm lentotuhkaa, b) 200 μm piidioksidihiekkaa, c) 250 μm alumiinioksidipartikkeleita. [12, s. 11-6]

Partikkeliominaisuudet ovat tärkeä mutta verrattain vähän tutkittu aihe eroosiokulumisen piiristä. Varmaksi tiedetään vain se, että kovat partikkelit aiheuttavat suurempaa eroosiokulumisnopeutta verrattuna pehmeisiin partikkeleihin. Partikkelien terävyyden tiedetään myös nopeuttavan eroosiokulumista. Molemmat näistä parametreista on sisällytetty eroosiokulumisen numeerisiin malleihin. Partikkelikovuuden ja substraatin välisen kovuuden suhde näyttää olevan kuitenkin hallitsevin parametri. Partikkelikovuuden merkitys nousee selvästi esiin, kun joidenkin eroosiopartikkelien, kuten alumiinioksidin, kovuutta verrataan perusmateriaaleihin, kuten niukasti seostettuihin teräksiin. Tässä tapauksessa partikkelin ja substraatin välinen kovuusero on kymmenkertainen. [5, s. 530]

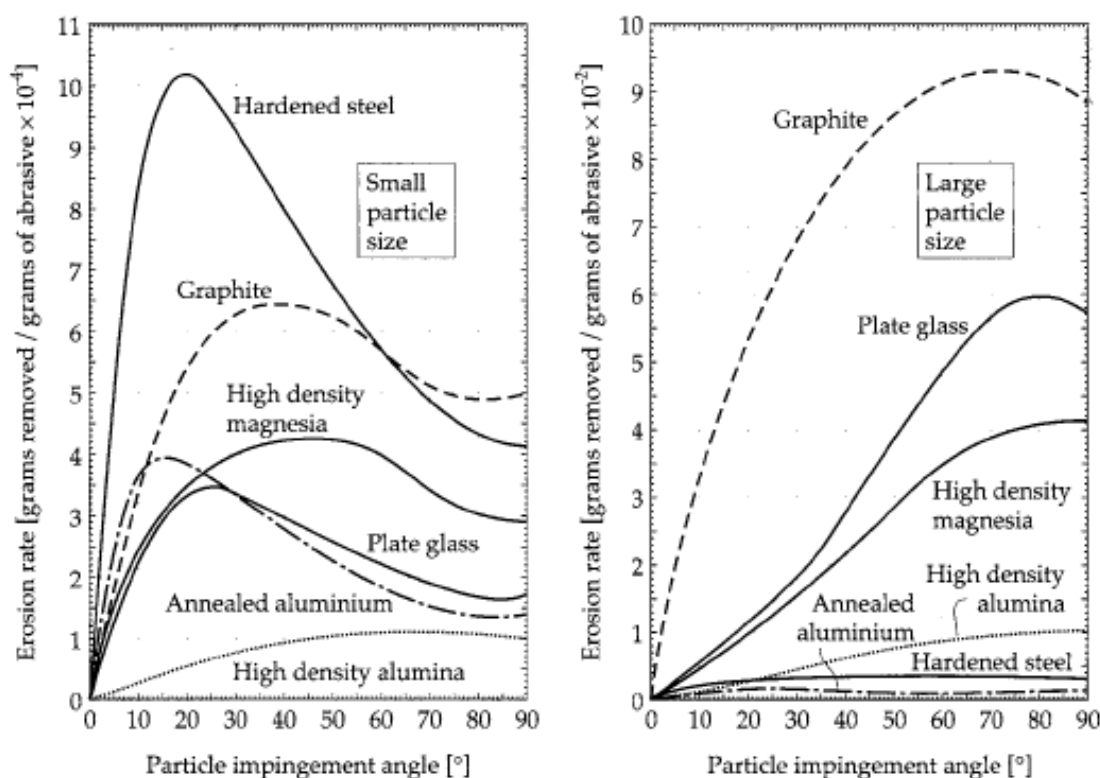
Partikkelin kovuuden vaikutus kulumiseen riippuu hyvin paljon siitä, onko se sitkeänvai hauraantyyppin kulumista. Hauraantyyppin tapauksessa partikkelin kovuudella on suurempi merkitys kuin sitkeän kulumisen tapauksessa. On oikeastaan mahdotonta erottaa kovuuden merkitystä täysin muista ominaisuuksista, kuten partikkelin geometriasta. Esimerkiksi jos partikkeli on kova mutta verrattain tylppä, on epätodennäköistä, että se aiheuttaa vakavaa eroosiokulumista. Tylpällä partikkelilla on enimmäkseen kaareutuvia pintoja ja se lähestyy muodoltaan pyöreää muotoa, kun taas terävä partikkeli koostuu tasaisista pinnoista, jotka liittyvät toisiinsa pienisäteisillä kulmilla, jotka ovat kriittisiä kulumisprosessin kannalta. [5, s. 530]

2.3.4 Partikkelikoon vaikutus

Käytännön sovelluksissa yleisesti tavattavat partikkelien koot ja niiden vaihtelut vaikuttavat voimakkaasti eroosiokulumismekanismeihin. Tehty testisarja lasilla, teräksellä ja grafiitilla paljasti, että partikkelikoon kasvattaminen 8,75 μm :n halkaisijasta 127 μm :iin muutti eroosiomekanismin sitkeästä hauraaksi. Tämä aiheuttaa eroosiokulumisen huiipun siirtymisen noin 30°:sta noin 80°:een, ja mikä tärkeintä, se aiheutti eroosiomäärän

dramaattista kasvua, jota esitellään kuvassa 15 tarkemmin. Molemmissa tapauksissa eroosiopartikkeleina käytetyn piikarbidin törmäysnopeus oli 152 m/s. [5, s 530]

Kuvasta 15 voidaan myös havaita, että partikkelin koko ei vaikuta pelkästään kulumisnopeuteen, vaan se muuttaa myös huomattavasti materiaalien välisiä eroja eroosiokulumista vastaan. Käytettäessä pientä partikkelikokoa materiaalit olivat kestävyysjärjestyksessä seuraavasti: korkeatiheyksinen alumiinioksidi (high density alumina) > pehmeäksihehkutettu alumiini (annealed aluminium) > lasilevy (plate glass) > korkeatiheyksinen magnesiumoksidi (high density magnesia) > grafiitti ja karkaistu teräs (graphite and hardened steel), korkeatiheyksisen alumiinioksidin ollessa kestävin ja teräksen heikoin. Tässä tapauksessa, pois lukien pehmeäksihehkutettu alumiini, eroosiokulumisnopeus riippuu kulumisen materiaalin kovuudesta, esimerkiksi alumiinin muokkauslujittuminen voi olla huomattavaa. Toisaalta käytettäessä isoja partikkeleita kestävyysjärjestys onkin muotoa: pehmeäksihehkutettu alumiini > karkaistu teräs > korkeatiheyksinen alumiinioksidi > korkeatiheyksinen magnesiumoksidi > lasilevy > grafiitti. Tässä tapauksessa materiaalin sitkeys nousee merkittävään asemaan. Materiaalit, jotka eivät ole sitkeitä tai kovia, pärjäävät tällöin huonosti. [5, s 530 - 531]



Kuva 15. Partikkelikoon vaikutus eroosiotyyppiin sekä eroosion keston. [5, s. 531].

Kulumistyyppien muutoksen uskotaan johtuvan materiaalin keskimääräisestä vikatiheydestä (average spacing of defects), esimerkiksi pienistä onkaloista ja säröistä itse materiaalissa. Iskeytyvien partikkelien ollessa pieniä vain pieni osa niistä on tekemisissä tällaisten materiaalivirheiden kanssa. Törmäyskohdassa syntyy iskeytymisen vaikutuk-

sesta pinnan alle jännityskenttä, joka vastaa kooltaan iskeytyvää partikkelia. Materiaalin virheettömyys edesauttaa plastista muodonmuutosta ja siihen tarvittavia mekanismeja, ja se onkin vallitseva eroosiomekanismi pienillä partikkeleilla. Materiaalikadon synnyttämiseksi tarvitaan toistuvaa plastista muodonmuutosta, ja siksi tämän tyyppinen kulumisen onkin verrattain hidasta. Suuret eroosiota aiheuttavat partikkelit osuvat iskeytymiskohdassa yleensä aina materiaalivirheisiin, ja siksi kulumismekanismina on hauraantyyppin kulumisen. Tällä tavoin säröjen eteneminen voi olla hyvinkin nopeaa, ja tästä syystä hauraantyyppin eroosiokulumisen saattaa olla hyvinkin tuhoisaa. [5, s. 531]

Kokeelliset tulokset osoittavat, että alle 10 μm halkaisijaltaan olevat partikkelit tuottavat häviävän vähän eroosiokulumista. Grant et al. sekä Kotwal et al. ovat havainneet altistaessaan sitkeitä materiaaleja alumiinioksidi-, ja piioksidipartikkelien kulutukselle, että isommat partikkelikoot aiheuttavat suurempia eroosiomääriä, mutta partikkelikoon vaikutus vähenee iskeytymisnopeuden vähetessä. [15, 16]

Eri kokoluokkiin jaotelluilla kvartsi- ja partikkeleilla toteutetut sitkeiden materiaalien kokeellisesti mitatut eroosiomäärät viittaavat partikkelikoon kasvun lisäävän eroosiokulumisnopeutta. Partikkeleilla näyttäisi olevan myös kynnysnopeus, jonka ylittävillä partikkeleilla ei koko enää tuntuisi vaikuttavan eroosiokulumisnopeuteen. Tämä arvo näyttää kasvavan lineaarisesti iskeytymisnopeuden mukana [17]

2.3.5 Partikkelivirtauksen määrä

Partikkelivirtauksen määrä (flux rate) tai toisin sanoen törmäävän materiaalin massa pinta-alaa kohden on eräs eroosiokulumisen keskeinen parametri. Eroosiokulumisnopeus on suoraan suhteessa vuon määrään tiettyyn rajoittavaan pisteeseen asti. Tämä rajan olemassaolo on todennettu useissa tutkimuksissa, ja sen on uskottu johtuvan pinnasta kimpoavien ja siihen iskeytyvien partikkelien keskinäisestä kanssakäymisestä. Tämä rajoittava partikkelivuon määrä vaihtelee, ja se alkaa elastomeereillä 100 $\text{kg/m}^2\text{s}$:sta ja nousee jopa 10 000 $\text{kg/m}^2\text{s}$:iin metallien eroosiossa isoilla ja nopeilla partikkeleilla. Kulumisnopeuden pieni lasku on myös mahdollista, jos vuon saturaatoraja ylitetään. [5, s. 531]

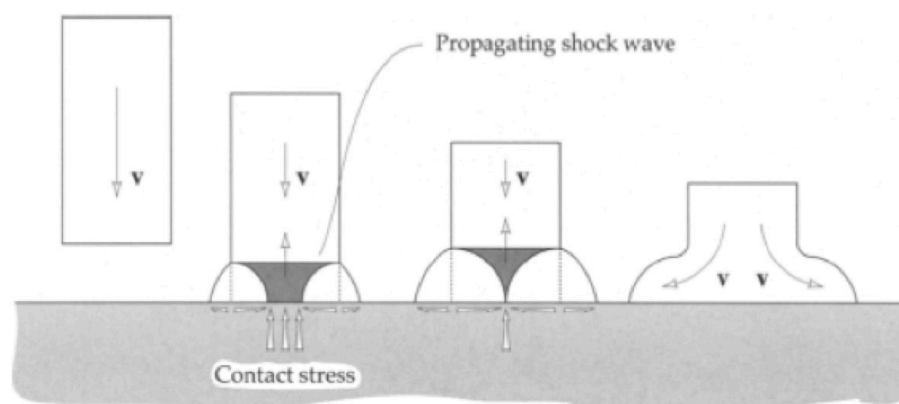
Erittäin suuret partikkelivuot tuottavat suojaavan efektin pinnasta kimpoavien partikkelien muodossa. Kimmotessaan pinnasta ne sekoittuvat iskeytyviin partikkeleihin. Siksi eroosiomäärän on huomattu nousevan vuon pienetessä, kunnes päästään tilanteeseen, jossa partikkelivuon vähentymisellä ei ole enää juurikaan vaikutusta eroosiokulumisnopeuteen. [12, s. 11-6]

Eroosiokulumisen itämisajalla viitataan aikaan, joka on eroosion alkamisesta ensimmäiseen mitattavissa olevan kulumisen syntymiseen. Itämisajan sisällä tapahtuva eroosio voi olla mitätöntä tai jopa negatiivista. Jälkimmäinen johtuu eroosiota aiheuttavien par-

tikkeliin hautautumisesta kuluvan materiaalin pintaan. Itämisajan on yleisesti uskottu kertovan pinnanalaisen vaurion kasautumisesta, esimerkiksi säröjen tai materiaalin sisäisten jännitysten muodossa, jotka edeltävät kulumista aiheuttavien partikkelien irtoamista. Itämisajan loputtua alkaa kuluminen yleensä vakionopeudella [5, s. 531]

2.3.6 Eroosiokulumismekanismit nesteillä

Partikkelinopeuksien ollessa riittävän suuria kykenevät nesteet aiheuttamaan yhtä paljon tuhoa kuin kiinteät aineet. Erinomainen esimerkki tästä on lentokone lentäessään pilvien läpi tai turbiinin lavat kosteassa höyryssä. Bowdenin ja Bruntonin tekemä sarja erityisen elegantteja kokeita paljasti nesteiden aiheuttaman eroosion toimintamekanismin. Sylinterin muotoisia vesipisaroita singottiin erittäin suurella nopeudella kohteeseen. Suurnopeuskameran avulla oli mahdollista havainnoida törmäystapahtumaa yksityiskohtaisesti. Tämän avulla saatiin paljastettua, kuinka näihin nestemäisiin ammuksiin syntyi hetkellisesti iskuaalloja. Iskuaallot mahdollistavat törmäyspaineen vapautumisen. Korkea törmäyspaine pysyy materiaalin pinnassa niin kauan, kunnes iskeytymis- tai paineaallot ovat menneet nesteestä läpi. Kuvassa 16 on käsitteellinen kaavakuva (sylinterinmuotoisen) nestepartikkelin iskeytymisestä, sen aiheuttamasta paineesta ja tapahtuman eri vaiheista. [5, s. 532]



Kuva 16. Nestemäisten partikkelien eroosiomekanismit kiinteällä pinnalla. [5, s.532]

Kontaktipaine voidaan määritellä seuraavalla kaavalla:

$$p = \rho v_s v \quad (3)$$

p kontaktipaine törmäyksessä [Pa];

ρ nesteen tiheys [kg/m³];

v_s äänennopeus nesteessä [m/s];

v nesteen nopeus törmäyksessä [m/s].

Törmäävien pisaroiden kontaktipaineet voivat kasvaa hyvinkin suuriksi. Esimerkiksi pisan, joka iskeytyy nopeudella 250 m/s, törmäyspaine on:

$$p = 1000 \times 1500 \times 250 = 375 \text{ MPa}$$

Nopeudella 1000 m/s iskeytyvän vesipisan arvioidaan nostavan paineen törmäyksen aikana erittäin korkeaan 1.5 GPa arvoon. Törmäyspaineen keston määrittää paineen vapautumisaallon (pressure release wave) nopeus pisan keskipisteessä. Nämä paineaallot liikkuvat äänen nopeudella, ja 3 mm halkaisijaltaan olevalla vesipisaralla iskun kesto on noin 1 μ s (äänen nopeus vedessä on noin 1500 m/s). [5, s. 532]

Nesteen aiheuttama kuluminen on siis lukuisten hetkellisten kontaktijännityspulssien iskeytymistä materiaalin pintaan. Kulumismekanismi riippuu näin ollen nesteen nopeudesta. Hitailla nopeuksilla kuluva materiaali karhenee ensin kauttaaltaan, mistä seuraa satunnaisten kraatterien muodostusta. Kraatterien reunoille saattaa muodostua huullos, jonka myöhemmät iskut voivat irrottaa. Suurilla törmäysnopeuksilla iskeytyvien pisaroiden iskujen voimasta kuluvaan materiaaliin muodostuu kuoppia tai jopa reikiä. Jos kuluva materiaali on haurasta, niin silloin kuluminen saattaa tapahtua säröilyn kautta. [5, s. 532]

Iskeytymisnopeuksien ylittäessä 250 m/s ja pisaroiden halkaisijan ollessa yli 200 μ m vesipisarat ovatkin pääsyyllisiä höyryturbiinien lapojen ja yliaänilentokoneiden runkojen eroosiokulumiseen. Yli 800 μ m halkaisijaltaan olevilla pisaroilla on iskeytyessään luonnollisesti enemmän tehoa verrattuna pienempiin pisaroihin. Päälystämättömillä teräksillä on havaittu austeniittisen, ilman karbideja olevan pintakerroksen, antavan hyvän suojan nesteiden aiheuttamalta eroosiolta. Austeniittisen pinnan muuttuminen martensiitiksi ei aiheuta pelkästään puristusjännitystä vaan myös lisää kulumisen kestoa. High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) -pinnoitteet ovat käyttökelpoisia nestepartikkelien matalammilla iskeytymisnopeuksilla. Suurilla törmäysnopeuksilla halkeilu nousee tämän kaltaisten pinnoitteiden käyttöä rajoittavaksi tekijäksi. [17]

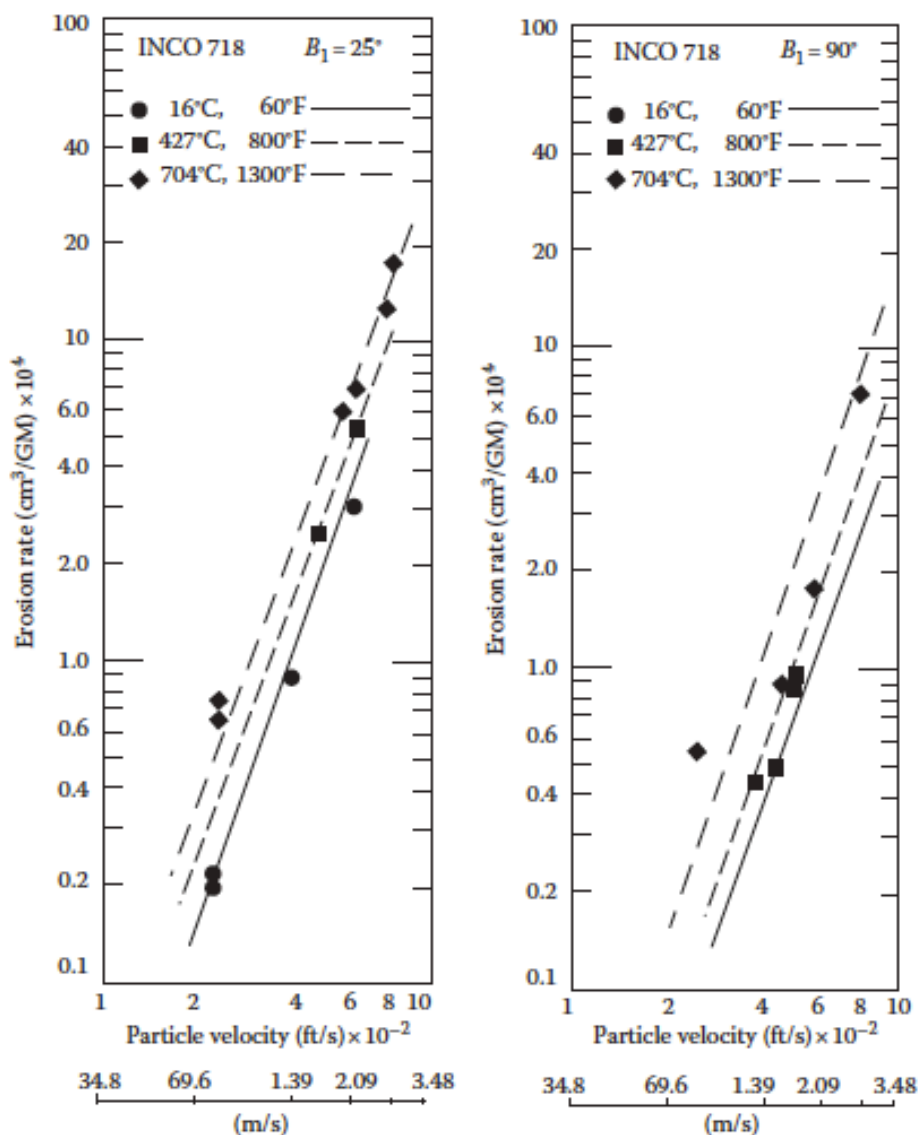
Teollisuudessa useasti käytetty kloorattu vesi voi vaikuttaa eroosiokulumisnopeuteen. Esimerkiksi HVOF -pinnoitteet, jotka on suunniteltu kestämaan korroosio-eroosiota, klooripitoista höyryä ja pisaroita, kuluvat huomattavasti kiihtyneemmällä vauhdilla karbidien hapettumisen johdosta. Tällaisissa tilanteissa nikkelipohjaiset kromiseosteiset pinnoitteet ovat osoittautuneet tehokkaimmiksi. Klooripitoisilla vesillä toimivien höyrykattiloiden eroosio-korroosion määrä voi nousta niin mittavaksi, että boileria pitää käyttää alentuneella lämpötilalla, jotta höyrykattilan komponentit saavuttaisivat riittävän pitkän eliniän. [18]

Aikaisemmat kokeet ovat osoittaneet eroosiokulumisen keston olevan suoraan verrannollista materiaalin sitkeyteen, ja siksi UHMWPE (Ultra-high-molecular-weight polyethylene, erittäin korkean molekyylipainon polyeteeni) eroosiokuluu polyesterinhartsia hitaammin. Kuten kaavasta 1 voi huomata, kulumisnopeus on hyvin vahvasti kytkeyty-

nyt partikkelien iskeytymisnopeuteen. Eksponentti n saa nesteiden eroosiossa yleensä metalleilla ja polymeereillä arvoja väliltä 4 - 6, mutta lasin ollessa kyseessä tämä arvo voi nousta jopa 12:een asti. Tällaisissa kulumistapauksissa saatetaan havaita myös itämisaika, jonka aikana kuluminen on mitätöntä. Itämisajan pituus, joka ei ole koskaan kovin pitkä, on kääntäen verrannollinen iskeytymisnopeuteen. Suurin osa tehdyistä tutkimuksista on suoritettu vedellä. Muiden nesteiden aiheuttamaa eroosiota on tutkittu rajoitetusti. Suuritiheyksisten nesteiden uskotaan edistävän kulumista. Esimerkki tästä on tetrakloorimetaani (CCl_4), jonka tiheys on noin 1700 kg/m^3 ja joka aiheuttaa veteen verrattuna nopeampaa eroosiokulumista. [5, s. 533]

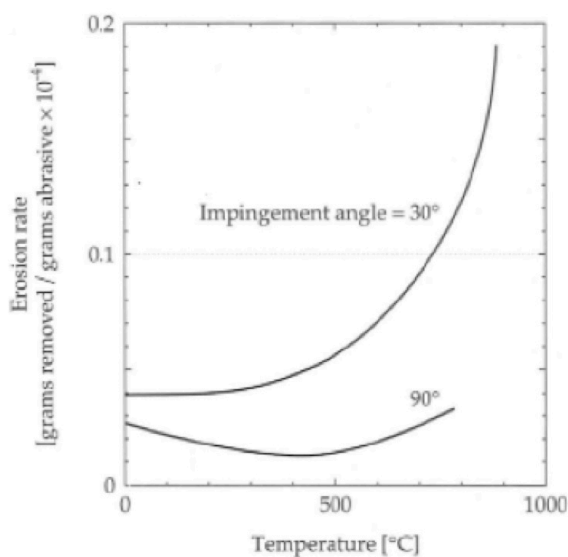
2.3.7 Lämpötilan vaikutus eroosiokulumiseen

Eroosiokulumisnopeuden on huomattu kaksinkertaistuvan $650 \text{ }^\circ\text{C}$:ssa huoneenlämpötilaan verrattuna. Siksi onkin tärkeää, että eroosiokokeita suoritetaan myös korkeissa lämpötiloissa, tarkkaan hallituissa olosuhteissa, ja että myös kohde on kuumennettu kauttaaltaan haluttuun lämpötilaan ennen kuumennetuilla partikkeleilla tehtävää eroosiokoea. $300 \text{ }^\circ\text{C}$:n – $400 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötiloissa SiC ja SiO_2 partikkelit tuottivat selkeästi enemmän ja lentotuhkapartikkelit vain vähän enemmän eroosiokulumista höyrypannuun verrattuna huoneenlämmössä tapahtuvaan vastaavaan tilanteeseen. Lämpötilannousu aiheuttaa eroosiokulumisnopeuden kasvua, joka johtuu kohdemateriaalin muuttuneista mekaanisista ominaisuuksista. Kuvassa 17 on esitelty tyypillisiä lämpötilan, iskeytymisnopeuden ja eroosionopeuden vaihteluja. Drensky et al. (2011) löysivät tutkimuksissaan, että polymeerimatriisikomposiiteilla huippu- ja kokonaiseroosio kasvoivat lämpötilan nousun myötä. Lämpötilan vaikutuksien kulumiseen huomattiin palautuvan tavallisiksi, kun iskuolosuhteet muutettiin takaisin normaaleiksi. [12, s. 11-6]

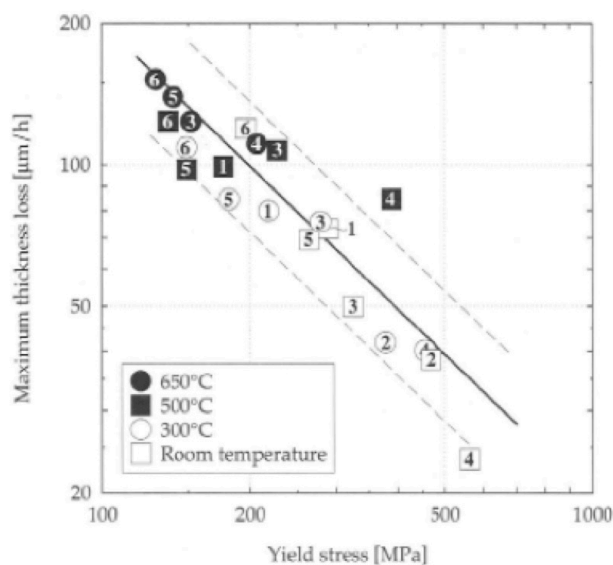


Kuva 17. Lämpötilan ja törmäysnopeuden vaikutuksia eroosiokokeissa. [12, s. 11-6]

Eroosion määrä ja mekanismit ovat hyvin riippuvaisia lämpötilasta. Lämpötila vaikuttaa primäärisesti pehmentämällä erodoituvaa materiaalia ja lisäksi eroosion määrää. Lämpötilan vaikutusta ruostumattomien terästen eroosiokulumiseen esitellään kuvassa 18. Tässä tapauksessa eroosiota aiheuttavat aineet ovat piikarbideja, jotka iskeytyvät typpi-atmosfäärissä ruostumattomaan teräkseen nopeudella 30 m/s. Kulumisen kannalta ei tapahdu merkittävää muutosta ennen kuin lämpötila nousee yli 600 °C:een, jonka jälkeen eroosiomäärä kasvaa merkittävästi. Tämä lämpötila käy yksiin teräksen pehmenemispisteen kanssa. Materiaalin mekaanisilla ominaisuuksilla eroosiokulumisen aikaisessa lämpötilassa ja eroosion määrällä onkin selkeä yhteys, joka käy ilmi kuvasta 19. [5, s. 533]



Kuva 18. Lämpötilan vaikutuksia ruostumattoman teräksen eroosiokulumiseen. [5, s. 534]



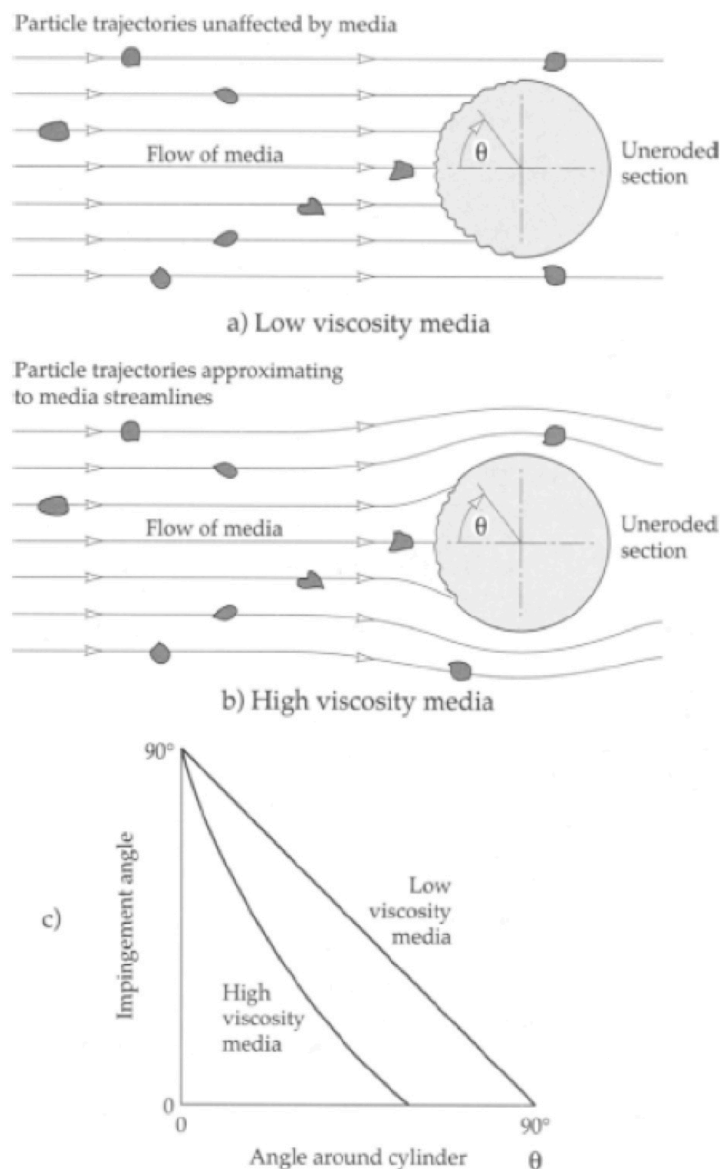
Kuva 19. Eroosionopeuden ja materiaalin mekaanisten ominaisuuksien suhde korotetuissa lämpötiloissa: 1) Hiiliteräs, 2) 1,25Cr-1Mo-V teräs, 3) 2,25Cr-1Mo teräs, 4) 12Cr-1Mo-V teräs, 5) 304 teräs ja 6) Alloy 800. [5, s. 534]

Eroosion tapahtuessa oksidoivassa ympäristössä ja korkeassa lämpötilassa on suuri mahdollisuus, että kulumisen lisäksi mukana on myös korroosiota, joka lisää näin entistään kulumisen vaikutuksia. Materiaali poistuu erodoituvasta pinnasta suhteellisen ohuina oksidikerroksina, ja tällainen kulumisprosessi voi olla huomattavasti nopeampaa kuin sitkeän metallin eroosio. Riittävän korkeissa lämpötiloissa alla oleva metalli ei kuitenkaan pääse kosketuksiin iskeytyvien partikkelien kanssa johtuen pinnassa olevan

oksidikalvon paksuuden kasvamisesta. Tällöin oksidikerroksen kasvunopeus materiaalin mekaanisten ominaisuuksien sijaan kontrolloi eroosiokulumista. [5, s. 534-535]

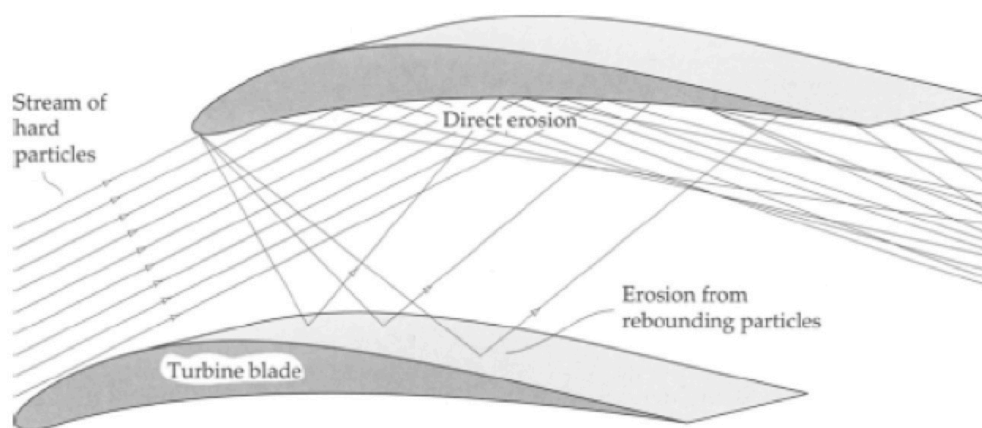
2.3.8 Eroosioväliaineen vaikutus kulumiseen

Yleensä eroosiota aiheuttavia ainesosasia kuljettaa jokin väliaine, esimerkiksi vesi tai ilma. Eroosiopartikkelien ja nestemäisen väliaineen sekoitus tunnetaan nimellä liete (slurry). Väliaineen ominaisuuksilla on yllättävän suuri vaikutus lopulliseen kulumisnopeuteen. Sen tärkeimpiä ominaisuuksia ovat mm. viskositeetti, tiheys ja turbulenssi, sekä mikroskooppisella tasolla sellaiset ominaisuudet kuten korrosiivisuus ja voitelukapasiteetti. On todistettu, että voiteluaineen pieni lisäys eroosiota aiheuttaviin lietteisiin vähentää kulumista merkittävästi. Myös väliaineen hyvä jäähdytysominaisuus partikkelien iskeytymisen aikana voi tuottaa samankaltaisia etuja. Väliaineen virtausvastus, lietteen ollessa tahmeaa, voi muuttaa partikkelien iskeytymiskulmaa. Tästä on tarkempi esimerkki kuvassa 20. [5, s. 534]



Kuva 20. Väliaineen vaikutus eroosiota aiheuttavien partikkelien iskeytymiskulmaan. [5, s. 535]

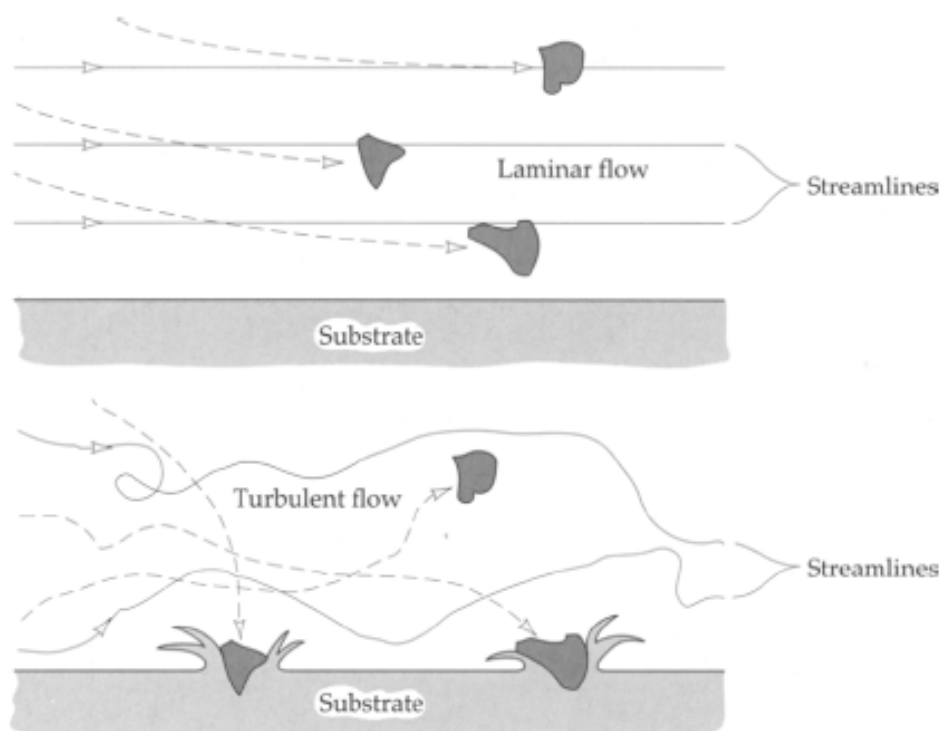
Kasvaneen virtausvastuksen johdosta tahmeammilla lietteillä voidaankin siis todeta, että partikkelit iskeytyvät eroosion kohteena olevan sylinterimäisen kappaleen sivuille. Väliaine vaikuttaa kohteen kulumisen paikkaan ja kulumistyyppiin, koska iskeytymiskulma pienenee ja painopiste siirtyy kohti sylinterin sivua. Väliaineesta johtuva iskeytymiskulman pienentyminen lisää abraasiotyyppisten kulumismekanismien esiintymistä eroosiokulumisessa. Kattava partikkelien liikerata-analyysi on välttämätön, jos halutaan arvio käytännön sovelluksen kulumisnopeudesta. Esimerkkinä tästä ovat mm. kaasuturbiinin tulopuolen (inlet) lavat. Tulopuolen lavoille tehty liikerata-analyysin vastaavuus olikin erinomainen käytännön sovelluksessa havaittujen kulumakohtien kanssa. Esimerkki eroosiota aiheuttavien partikkelien lentoradoista höyryturbiiniin lavoissa on esitetty kuvassa 21. [5, s. 536]



Kuva 21. Esimerkki partikkelien lentorata-analyysistä eroosion ennustamisessa. [5, s. 536]

Väliaineen vaikutusta voidaan arvioida termillä törmäystehokkuus (collision efficiency), joka on suhdeluku pintaan törmäävien partikkelien ja teoreettisen, ilman väliainetta tapahtuvien törmäysten, lukumäärän välillä. Törmäystehokkuuden on havaittu vähenevän rajoittavasta arvosta 1 isoilla partikkeleilla (esimerkiksi $750\text{ }\mu\text{m}$:n kokoisilla) aina alle 0,1:n (pienillä $75 - 90\text{ }\mu\text{m}$:n kokoisilla partikkeleilla) väliaineen viskositeetin ollessa $0,005\text{ Pas}$. Törmäystehokkuuden lasku johtuu siitä, että viskoosi väliaine kaartaa partikkeleiden liikerataa kuluvan pinnan ohi, kuten kuvasta 22 käy ilmi. Eroosiomäärä vastaa melko hyvin törmäystehokkuuden trendiä. Tämä osoittaa, että väliaineen primäärinen vaikutus on poikkeuttaa partikkeleita sivuun törmäyskurssiltaan kohti kuluvaa pintaa. Iskeytymisnopeuden kasvu pienentää väliaineen merkitystä. Suurilla lietteen virtausnopeuksilla viskositeetti vaikuttaa vain suurten partikkelien liikerataan. [18]

Väliaineen turbulenssi kiihdyttää eroosiokulumista, koska partikkelit iskeytyvät todennäköisemmin turbulentissa virtauksessa kuin laminaarisessa virtauksessa, jossa väliaineella on taipumus vetää partikkeleita kuluvan pinnan suuntaisesti. Kuvassa 22 esitellään myös eroja partikkelien käyttäytymisestä turbulentissa ja laminaarisessa virtauksessa.



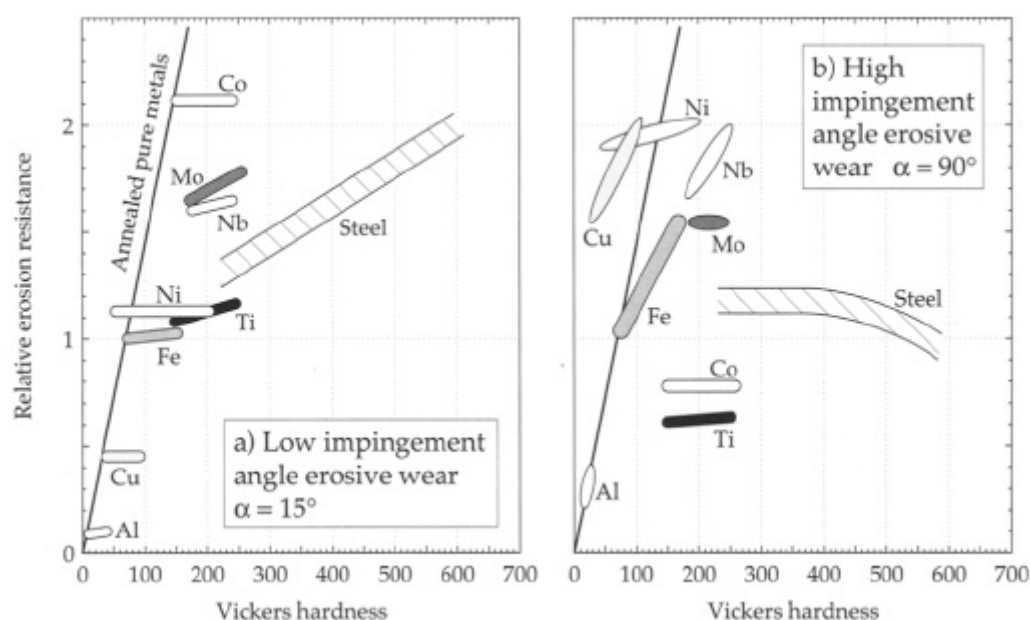
Kuva 22. Virtauksen vaikutus eroosiokulumisessa [4, s. 537]

Poikkeuksen tästä käyttäytymisestä tekee tilanne, jossa laminaarinen virtaus on koh-tisuorassa kuluva pintaa vasten. Tällainen tilanne syntyy silloin, kun virtaussuihku iskeytyy suoraan pintaan. Tällöin kuluminen kohdentuu nestemäisen suihkuvirtauksen alle ja synnyttää verrattain kulumattoman rengasmaisen alueen kulumakohdan ympäril-le. Ilmiö tunnetaan nimellä sädekehä (halo). Suoraan suihkuvirtauksen alle kohdentuvan eroosioilmiön vaikutukset voittavat näin virtausturbulenssin ja -matkan vaikutuksen. [19]

2.3.9 Eroosiokulumiskestävyyden lisääminen

Teräksellä on taipumus muokkauslujittua partikkelien iskeytyessä siihen. Tämän takia onkin tärkeä hahmottaa iskeytymiskulmaa, sillä sen avulla voidaan ymmärtää, millaisia ominaisuuksia kulutukselle alttiiksi joutuva teräs tarvitsee selvitäkseen käyttöympäris-tössään. Pienillä iskeytymiskulmilla partikkelit kuluttavat terästä leikkautumalla ja isoil-la iskeytymiskulmilla väsymiskulumisen kautta. Hauraat materiaalit kuluvat haurasmur-tumien kautta ja kuluminen niissä on nopeinta silloin, kun partikkelivirta on koh-tisuoraan pintaa vasten. Näissä kaikissa tapauksissa kulumisnopeus on suoraan verran-nollinen partikkelien kineettiseen energiaan, eli siis törmäysnopeuden neliöön. Eroosiokulumista voidaan ehkäistä suunnittelemalla rakenne siten, että partikkelien no-peus minimoidaan ja tulokulma valitaan sopivaksi ko. materiaalille. Myös kappaleen pinnoittamista kulutusta kestäväillä pinnoitteilla kannattaa harkita. [1, s. 120]

Materiaalin ominaisuuksilla on voimakas vaikutus sen eroosiokulumisen keston, ja siksi niitä onkin tutkittu kattavasti. Kuten abrasiivisen kulumisen tapauksessakin on huomattu, parannukset materiaalien mekaanisissa ominaisuuksissa eivät suoraan takaa niiden parempaa eroosiokulumisenkestoa. Esimerkiksi eroosiokulumisnopeuden on huomattu tietyissä tapauksissa nousevan materiaalin lujittuessa. Materiaalin optimoinnin hankaluus piileekin siinä, että kulumisnopeuteen vaikuttavat sekä materiaaliominaisuudet että eroosiokulumisen kaikki eri tekijät. Hyvä esimerkki tästä saadaan vertailemalla eri metallien eroosiokulumisen kestoja eri iskeytymiskulmilla. Matalilla iskeytymiskulmilla karkaistut teräkset kuluvat pehmeitä teräksiä vähemmän; tilanne kääntyykin päinvastaiseksi suurilla iskeytymiskulmilla. Tämä tilanne on esitetty kuvassa 23, jossa eroosiokulumisnopeus on esitetty iskeytymiskulmilla 15° ja 90° eri metallien teräslajien kovuuden funktiona. Abrasiivina on käytetty halkaisijaltaan noin 1mm:n kokoisia pii-karbidipartikkeleita iskeytymisnopeuden ollessa 30 m/s. [5, s. 537-538]

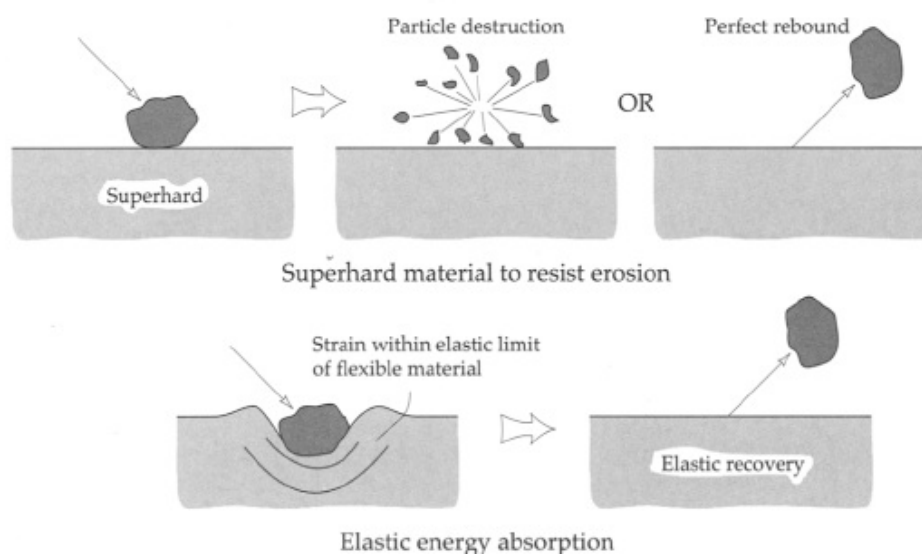


kuva 23. Materiaalin primääristen ominaisuuksien ja eroosion parametrien vaikutus eroosiokulumisnopeuteen. [5, s. 538]

On ilmeistä, että matalilla iskeytymiskulmilla materiaalin kovuus ja työstökarkenemistaipumus kykenevät pitämään kurissa kvasi-abrasiivisen kulumismekanismien. Tässä tapauksessa materiaaleja voidaan arvioida puhtaan metallin kovuuden perusteella. Kuvasta 23 voidaan todeta, että 15° :n iskeytymiskulmalla parhaimmin eroosiokulumista kestävä metalli on koboltti, kuparin ollessa toiseksi huonoin. Iskeytymiskulman kasvaessa 90° :een materiaalien paremmuusjärjestys muuttuukin merkittävästi, sillä tällöin kupari onkin toiseksi paras kobolttin kulumisenkeston jäädessä kolmanneksi huonoimmaksi. Terästen lämpökäsittely parantaa eroosiokulumisen kestoja pienillä iskeytymiskulmilla, mutta heikentää sitä suurilla iskeytymiskulmilla. Yhteenvetona voidaankin siis todeta, ettei samankaltaisten materiaalien pieniä eroja, kuten vaikka kovuuden tai metal-

lien seosaineiden vaihteluita, voida tarkistella erikseen ottamatta huomioon koko eroosiokulumissysteemin ominaisuuksia. [5, s. 538]

Materiaalin eroosiokulumisen keston määrittelyn kannalta on hyödyllistä tarkastella yhtä materiaaliluokkaa kerrallaan, kuten polymeerejä, keraameja tai metalleja, jolloin eri materiaalien yksilölliset eroavaisuudet nousevat hyvin esille. Silloin niiden vertailua ei vaikeuta eri materiaaliluokkien luontainen reagointi eri muuttujiin, kuten esimerkiksi iskeytymisnopeuteen tai iskeytymiskulmaan. Ei ole olemassa mitään yleispätevää reseptiä erinomaisen eroosiokulumiskeston saavuttamiseksi. Hyvän eroosiokulumisen keston voi saavuttaa useammalla eri materiaalityypillä, koska eroosiokulumiselta voi suojata esim. kaksi erilaista yhtä aikaa toiminnassa olevaa mekanismia. Joissain tapauksissa materiaali voi olla erittäin kovaa ja sitkeää, jolloin iskeytyvä partikkeli ei kykene jättämään minkäänlaista jälkeä komponentin pintaan. Tällaista lähestymistapaa käytetään kehitettäessä eroosiota kestäviä metallisia tai keraamisia materiaaleja. Vaihtoehtoisesti käytettävä materiaali voi olla sitkeää mutta omata erittäin matalan kimmomoduulin, jolloin partikkelien kineettinen energia absorboituu iskun vastaanottavaan materiaaliin. Näitä erilaisia lähestymistapoja esitellään kuvassa 24. [5, s. 538]



Kuva 24. Vertailu korkean sekä matalan kimmomoduulin omaavan materiaalin toiminnasta eroosiokulumista vastaan. [5, s. 538]

Elastisen energian hyvän absorptiokyvyn johdosta kumilla on yleisesti uskottu olevan hyvä eroosiokulumisen kesto. Ensimmäinen partikkeli-isku ei välttämättä jätä mitään näkyvää jälkeä kumin pintaan. Kuluminen tapahtuukin hitaan väsymisprosessin kautta. Täyteaineettomilla kumeilla on hyvä eroosiokulumisen kesto, mutta abrasiivista kulumista ne eivät siedä. Eroosiokulumista kestävä materiaalin valintaan voivat vaikuttaa myös toisenlaiset vaatimukset, joihin voivat lukeutua toimintalämpötilat tai materiaalin läpinäkyvyys. Yli 200 °C:n lämpötilat luonnollisesti estävät polymeerien käytön, mutta jos materiaalin tulee olla läpinäkyvää, metallit eivät tällöin ole käyttökelpoisia. Esimer-

kiksi lentokoneiden tuulilasimateriaalin tulee kestää, läpinäkyvyydestään huolimatta, kovalla vauhdilla siihen iskeytyvää hiekan, pölyn ja sateen aiheuttamaa eroosiota. Polymetyylimetakrylaatin todettiin olevan paras valinta tähän kohteeseen, sillä se oli sitkeää eikä eroosiokulumisen merkittävästi heikentänyt sen läpinäkyvyyttä. Metallien, keraamien ja polymeerien hyvät puolet ja heikkoudet on esitelty kuvassa 25. [5, s. 539]

Material	Relative qualities regarding erosive wear resistance
Metals	Large range of toughness and hardness to suit any particle or impingement angle. Prone to high temperature corrosion and softening effects; corrosive media also harmful.
Ceramics	Very hard and increasingly tougher grades available. Resistant to high temperatures and corrosive media. Poor erosive wear resistance when brittle mode prevails.
Polymers	Tough polymers and rubbers provide good erosion resistance even in corrosive media. Usage is restricted however by a relatively low temperature limit.

Kuva 25. Eri materiaalikategorioiden eroosiokulumisen hyviä ja huonoja puolia. [5, s. 539]

Teräksen mikrorakenteen vaikutuksesta eroosiokulumisen kestoon käsittelevästä kirjallisuudesta saa sellaisen käsityksen, että sitkeä teräs on kaikkein kestäväintä tällaisissa käyttökohteissa. Teräksen karkeneminen martensiitiksi tarjoaa pienen lisän eroosiokulumisen kestoon muissa kuin hyvin matalissa iskeytymiskulman tapauksissa. Massiivisten tai lamellaaristen karbidien muodostuminen vähentää eroosiokulumisen kestoa. Tästä syystä eroosiokulumiselle altistuvassa komponentissa tulisi käyttää erilaista teräsläätua kuin abrasiiivisen kulumisen tilanteissa. Niukkaseosteisissa teräksissä ferriittinen faasi, joka sisältää riittävän määrän sferoidisia karbideja materiaalin lujittamiseksi, on erittäin tehokas yhdistelmä eroosiokulumista vastaan. Perliittiset teräkset eivät ole yhtä hyviä kulumisenkestoa vaativissa kohteissa verrattuna sferoidisiin teräksiin. [5, s. 539]

Terästen eroosiokulumiskäyttäytymisen on huomattu seuraavan klassista sitkeää eroosiotyyppiä, toisin sanoen kulumishuippu saavutetaan matalalla 30°:n iskeytymiskulmalla pinnanalaisten- ja pintasäröjen siivittämänä. Tämä viittaa siihen, että terästen eroosiokulumisen kestoa voi rajoittaa lähinnä sen sitkeyden puute. Hyvin pehmeille eroosiopartikkeleille, kuten hiilelle, karbidien lisäys teräkseen lisää hieman eroosiokulumisen kestoa. Teräksen tai valuraudan mikrorakenteen jäännösausteniittimäärän kohottaminen seostamalla on tehokas keino vähentää eroosiokulumistaipumusta. Noin 2,5 painoprosentin pii-lisäys hiiltä 0,7 painoprosenttia sisältävään teräkseen tai noin 0,45 painoprosentin pii-lisäys hiilenmäärältään 2,54 painoprosenttiseen valurautaan tuottaa hyvän suojan eroosiokulumista vastaan. Tällaisen teräksen optimaalinen lämpökäsittely on verrattain pitkäkestoinen austemperointi, jolloin kaikki martensiitti poistuu ja jäljelle jää jäännösausteniittia sekä bainiittista ferriittia. Jos jonkinlaista nyrkkisääntöä pitäisi

muodostaa eroosiokulumiselle alttiiksi joutuvien komponenttien teräslaadun valintaan, voisi se kuulua näin: mieluummin lisää sitkeyttä kuin kovuutta. [5, s. 539]

2.4 Kavitaatio

Virtaavien nesteiden ja lietteiden kanssa toimittaessa on pakko ottaa myös kavitaatio huomioon. Ilmiöön törmättiin ensimmäisiä kertoja höyrylaivojen potkureiden yllättävän kulumisen muodossa. Tämä onkin kavitaatiosta johtuvalle kulumiselle erittäin luonteva paikka. Kavitaatio johtuu metallin pintaan kohdistuvista jännitysiskuista, eli ohivirtaavan nesteen paine muuttuu ja nesteessä olevat kaasukuplat luhistuvat. [1, s. 120]

2.4.1 Kulumismekanismit

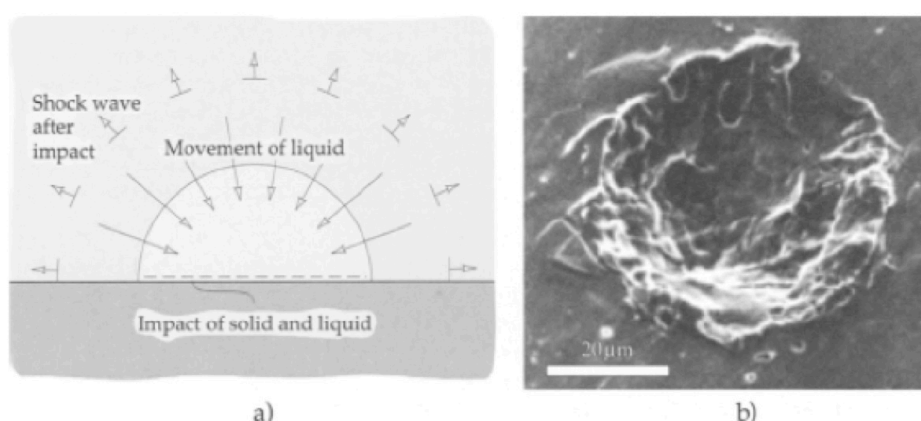
Kavitaatio -ilmiötä voi esiintyä, kun paine nesteessä laskee riittävän alhaiseksi synnyttämään kaasutäytteisiä onkaloita tai huokosia (kuplia). Tämä ilmiö voi esiintyä jopa huoneenlämmössä. Kuplia sisältävän nesteen altistuttua paineen nousulle saattavat kuplat äkillisesti luhistua. Tämä luhistuminen voi aiheuttaa erilaisia vaurioita pintaan paineaaltojen tai ns. microjet -ilmiön kautta.

Paineaaltojen tapauksessa kuplaa ympäröivä neste etenee hyvin nopeasti. Kuplan puristuessa pieneen tilaan paine kuplassa on hyvin korkea ja nesteen nopeus näiden kahden rajapinnassa on erittäin suuri. Tästä johtuen kuplassa oleva jäännöshöyry ei ehdi tiivistymään. Tällöin kuplan tilavuus on kutistunut jäännöskokoonsa ja sen sisällä vallitsee erittäin korkea paine. Paineen saavuttaessa huippunsa rajapinnalle syntyy paineaalto. Aalto etenee nesteessä kuplan koon kasvaessa ja saavuttaessa alkuperäisen kokonsa. Kuplan luhistumisen ja kasvamisen toistuminen aiheuttaa pinnalle syklistä räsitusta, joka saattaa johtaa pinnan väsymiseen. [20]

Luonteenomaisin piirre kavitaatiolle on kuplien toistuva muodostuminen ja luhistuminen nesteeseen kosketuksissa olevalla kiinteällä pinnalla. Nesteeseen liuenneiden kaasujen paineen alentuminen lähelle nollaa tai negatiiviseksi aiheuttaa kuplien muodostumista. Tällaiseen ilmiöön voi törmätä nestevirtauksen matkatessa geometrialtaan muuttuvan putkiston läpi, esimerkiksi halkaisijaltaan pienen putken avartuessa suuremmaksi. Virtauksen alapuoleinen terävä, nesteessä liikkuva objekti, kuten vaikka laivan potkuri, on erityisen altis kavitaatiolle. Kavitaatiovahinkojen välttämiseksi ideaalitapaus olisikin välttää negatiivista paineen muodostumista pintojen läheisyyteen, mutta käytännön sovelluksissa tällainen on monesti mahdotonta. [5, s. 542]

Kuplan luhistuessa kiinteällä pinnalla sitä vastapäätä oleva neste on ensin nopeasti kiihtyvässä liikkeessä, jonka jälkeen, törmätessään pintaan, se hidastuu voimakkaasti. Kiin-

teän pinnan ja nesteen välinen törmäys synnyttää voimakasta jännitystä, joka voi vaurioittaa kiinteitä pintoja. Jännitys saattaa saavuttaa tilapäisesti jopa 1,5 GPa:n arvoja. Kuplan muodostuminen sekä kokeellisesti todistettu reiänmuodostus metallin pintaan on esitetty kuvassa 26. Samassa kuvassa oleva kavitaatiokraatteri oli syntynyt indiumin pintaan, joka on pehmeä metalli. Kovemmilla materiaaleilla, kuten keraameilla, samanlaisen syvän kuopan muodostuminen on erittäin epätodennäköistä. Kovilla ja haurailta materiaaleilla pääsääntöiset kulumismuodot ovat murtuminen ja sirpaloituminen. [5, s. 542]



Kuva 26. Kavitaatiokulumisen mekanismi: a) kuplan luhistumismekanismi ja b) kokeellisesti tuotettu kavitaatiovaurio metallin (indium) pintaan. [5, s. 542]

Melkein kaikki materiaalit kärsivät pinnanalaisesta vaurioitumisesta kavitaation aikana. Yleisesti on myös havaittu työstökarkenemisen kertymistä sekä säröjen ydintymistä. Äärimmäisissä kavitaatiotapauksissa on havaittu reikien tiheyden olevan riittävä heikentämään kuluvan materiaalin matriisin huokoiseksi tai pesusienimäiseksi rakenteeksi. Vaikka kavitaatiolla on samankaltaisia törmäysprosesseja nesteen ja kiinteän välillä kuin nestemäisessä eroosiossa, eroavat ne silti merkittävästi toisistaan. Kavitaatiokulumisen on merkittävästi eroosiokulumista lievempi ja vähemmän kuluttava prosessi. Kavitaation tapauksissa kulumispartikkelien irrottamiseen tarvitaan miljoonia kavitointeja, kun vastaavasti nestepartikkelien tapauksessa muutama tuhat iskua riittää aiheuttamaan eroosiokulumista. Kavitaatiokulumisella on myös itämisvaiheensa, kuten myös eroosiokulumisella, mutta toisin kuin eroosiokulumisella, kavitaation tapauksissa kuluvan materiaalin massa ei kasva, ellei kavitoituva materiaali ime itseensä nestettä. [5, s. 543]

Kavitaatiokulumista hallitsee vahvasti nesteen pintajännityksen suuruus, ja sen aleneminen saattaaakin huomattavasti alentaa kavitaatiokulumisnopeutta. Vastaavasti korkea pintajännitys edesauttaa suurempien kuplien muodostumista, luhistuessa suurempaa törmäysenergiaa ja pienempää todennäköisyyttä suuren kuplan hajoamista useiksi pieniksi kupliksi. Veden pintajännityksen lasku 70 N/m:stä 30 N/m:iin käyttämällä kostut-

tavia lisäaineita vähensi kavitaation kulumisnopeutta huomattavasti. Kavitaation tapahtuessa korrodoivissa olosuhteissa saattavat jännitysmurtumat pahentaa kulumista. Esimerkkinä tästä ovat kavitaatiokulumisnopeuksien erot makeassa ja suolaisessa vedessä. [5, s. 543]

Eroosiokulumisen yhtäaikainen ilmeneminen saattaa kiihdyttää kavitaatiokulumista merkittävästi. Toisin sanoen näiden kahden kulumistyyppin synergiset vuorovaikutukset ovat hyvinkin mahdollisia ja vakavasti otettavia. Jos kavitoiva neste sisältää eroosiopartikkeleita, luhistuvat kuplat paiskaavat niitä suurella nopeudella kuluvaan pintaan. Tällöin kulumisnopeus on suurempaa kuin pelkällä kavitoinnilla tai eroosiokulumisella yksinään olisi. Esimerkkinä tästä ovat hiekkaista vettä käyttävät hydrauliturbiinit. [5, s. 543]

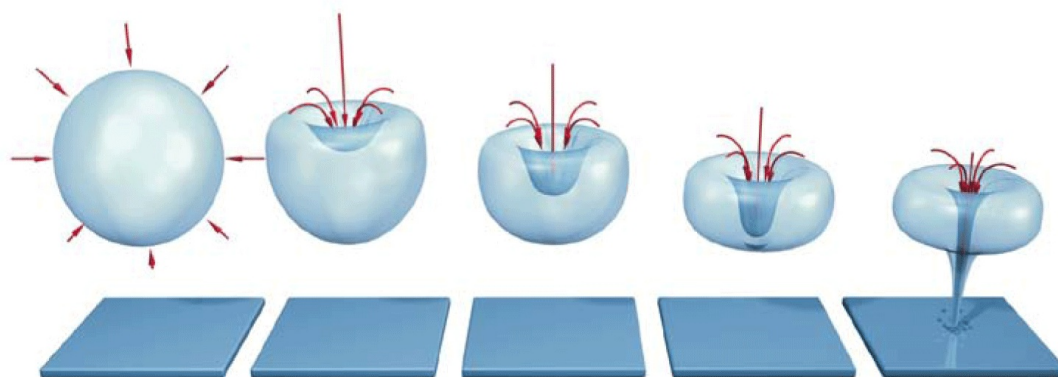
2.4.2 Microjets

Kavitaation aiheuttama vaurio on dynaaminen ilmiö, jonka synnyttää toistuvasti luhistuvia kavitaatiokuplia. Kuplan luhistuminen aiheuttaa materiaalin pintaan iskeytyvän microjet:n. Tämä johtaa kohonneisiin paikallisiin jännityksiin ja säröihin. Iskeytyvä painepulssi voi olla suuruudeltaan jopa 10^3 MPa:ia, vaikka joissain lähteissä painepulssin suuruudeksi on mitattu vain noin 10 – 16 MPa:n arvoja. Tällaiset äkilliset luhistumiset saattava irrottaa rasitukselle altistuvasta pinnasta pieniä partikkeleita. Johtuen suuresta jännityksestä välillä 0.3 – 2 MPa/ μ s, nestesuihkun suuresta nopeudesta (100 m/s:sta jopa 1000 m/s:iin asti), korkeasta pulssin amplitudista, lyhyestä pulssin kestoista (lyhyimmät 2–3 μ s ja pisimmät noin 20 μ s) ja erittäin pienestä luhistumisalasta (noin 10^{-10} m²), materiaalin heikentyminen tapahtuu nesteen virtauksen aiheuttaman eroosion omaisesti. Plastinen muodonmuutos, säröjen ydintyminen ja niiden eteneminen riippuvat kuormitushistoriasta ja kavitaatioeroosiokerroksen alapuolisesta pinnasta. On myös huomattu, että plastisen muodonmuutoksen aiheuttamiseen tarvittava energia on noin kymmenkertainen staattiseen jännitykseen verrattuna. [21]

Kun kupla on kiinteän pinnan läheisyydessä, pinnan puolelta ryöpsähtävällä nesteellä on hitaampi liikenopeus kuin nesteen puolelta sinkoavalla nesteellä. Alunperin pyöreä kupla pienenee epäsymmetrisesti, kuten kuvasta 27 käy ilmi, ja nesteestä muodostuva microjet sinkoaa paineiskun kohti kiinteää pintaa. Microjet:n nopeus riippuu monista tekijöistä, joista kuitenkin keskeisin on paine. [20]

Akustisessa kentässä virtaavaan nesteeseen tai nesteisiin vaikuttaa hydrodynaaminen ilmiö, joka voi alentaa painetta tietyissä kohdissa alle kriittisen arvon. Tämä on kytköksissä nesteen osapaineeseen. Näissä kohdissa kuplat ydintyvät nesteeseen ja ne kasvavat stabiiliin kokoonsa ja siirtyvät siitä virran mukana eteenpäin. Kuplien saavuttaessa korkeapaineisemman alueen ne muuttuvat epästabiileiksi ja luhistuvat väkivaltaisesti. Kup-

lat, jotka luhistuvat kaukana kiinteästä pinnasta, ovat yleensä symmetrisiä, jolloin paineaalto leviää ympäröivään nesteeseen. Kiinteässä pinnassa tai niiden läheisyydessä olevat kuplat luhistuvat yleensä epäsymmetrisesti. Osa kuplasta painuu kasaan muodostaen näin kiinteää pintaa kohti suunnatun nestesuihkun. Yleinen konsensus teoreettisten mallien ja mitattujen tulosten välillä on, että microjetit saavuttavat jopa 500 m/s:ssa nopeuden 2 - 3 μ s:n aikana. Tällöin kuplan luhistumisesta seuraa noin 1 - 1,4 GPa:n paine. [22]



Kuva 27. Kiinteän pinnan läheisyydessä olevan kuplan luhistumisen simulaatio. [23]

Kavitaatioprosessilla on neljä tunnusomaista tekijää, jotka ovat:

Korkea paine; Paine saavuttaa useiden satojen MPa:n arvon, korkeimmillaan jopa muutaman GPa:n. Tämä paine on useiden koneenrakennusmateriaalien elastista myötörajaa suurempi.

Pieni läpimitta; Microjet:n dimensiot ovat hyvin pienet, muutamasta mikrometristä muutamaan sataan mikrometriin. Sen vuoksi kiinteään pintaan kohdistuva isku osuu hyvin pienelle alueelle.

Lyhyt kesto; Iskun ajallinen kesto on lyhimmillään muutamia mikrosekunteja.

Korkea lämpötila; Luhistumisen paikallisuudesta johtuu, että lämpötila voi sen kohdalla nousta hyvin korkeaksi, jopa useaan tuhanteen Celsius -asteeseen. [20]

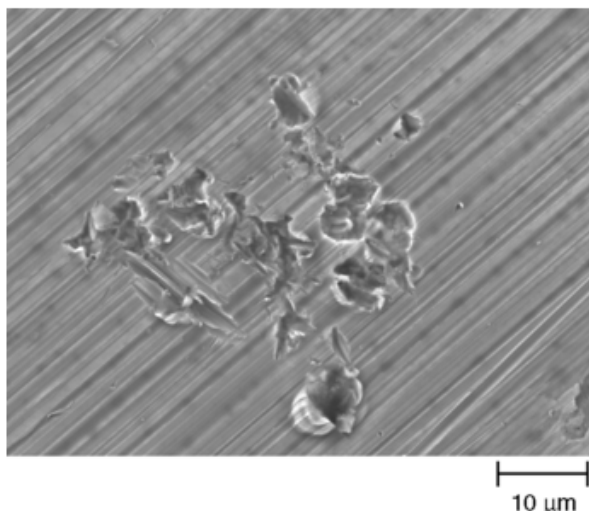
Vaikka edellinen antaa hyvän yleiskäsityksen kavitaatiokulumisen perusteista, ei monia havaittuja ilmiöitä silti voida täysin selittää paine-aalloilla tai yksittäisen kuplan luhistumismallin avulla. Jos kavitoivia kuplia on suuri joukko, saattavat ne synnyttää kavitaatioklusterin. Luhistuvien kuplien väliset vuorovaikutukset klusterimuodostelmassa voivat olla hyvinkin monimutkaisia. Klusterin ulkoreunalla luhistuvien kuplien tuottama energia voi siirtyä klusterin keskusta, mikä nostaa paikallisen hydrostaattisen paineen korkeammaksi kuin minkä itsenäisesti luhistuvat kuplat kykenisivät yksin tuottamaan. Microjet -ilmiön lisäksi myös nesteen virtauksella ja sen ominaisuuksilla on oma vaikutuksensa materiaalikadon tuottamisessa. Tämän vuoksi kaikkia havaittuja pintasäro-muodostumisia ei voida vierittää yksin microjet -iskujen harteille. [20]

2.4.3 Kavitaatioeroosio

"Mutta jos materiaalihäviö on kytköksissä väsymisprosesseihin materiaalin itsensä pinnassa, silloin ilmiötä kutsutaan kavitaatioeroosioksi", toteavat G. Bregliozzi et al. tutkimuksissaan. Määritelmä on periaatteessa oikea, mutta sitä täytyy laajentaa hieman lisää. Microjetien ja paineaaltojen yhdessä aikaansaamat rasitukset aiheuttavat kiinteän pinnan eroosiota. Kavitaatioeroosion initiaativaiheessa metalleilla kulumismekanismit toimivat raerajoilla ja liukunauhoissa. Tämä aiheuttaa pinnan aaltoilua, ja kavitaatioon synnyttämät säröt ydintyvätkin yleensä näihin vikakohtiin, jotka edustavat rakenteen jännityshuippukohtia. Materiaalihäviö syntyy sitkeän murtuman mekanismin kautta. [24]

Kavitaatioeroosio on siis materiaalihäviötä tai kiinteän pinnan plastista vääristymistä, joka johtuu nesteessä olevien kuplien luhistumisesta. Paineaallot ja microjetit tuottavat yhdessä mekaanista rasitusta kiinteään pintaan. Asia voidaan hahmottaa myös mekaanisesti kontaktin kautta. Tällaista rasitusta vastaisi silloin kitkaton tai kitkallinen kahden kiinteän pinnan välinen rasitus. Materiaalin pinta tai suoraan sen alapuolinen alue muokkautuu plastisesti, jos hydrostaattisen paineen tuottama jännitys ylittää materiaalin elastisen sietokyvyn. Kulumismekanismi muistuttaa jossain määrin abrasiivisesta kulumisesta aiheutuvan materiaalihäviön mekanismeja. Kavitaation aiheuttaman jännityksen jäädessä metallin elastiselle alueelle jatkuvasta ja syklistä kuplien luhistumisesta saat-
taa seurata väsymisen kautta vaurioita pinnan alla. Pinnan väsymismekanismi ei ota kuitenkaan huomioon ilmiön suuren nopeuden ja pienen tilavuuden vaikutuksia. Suuresta muokkautumisnopeudesta johtuu, että materiaalin käyttäytymistä sanelee herkkyyys muodonmuutosnopeudelle, kuten on asian laita myös kiinteä-kiinteä kontaktissa. Pieni tilavuus aiheuttaa mittakaavavaikutuksen, ja siksi muokkauslujittuminen ei vastaa täysin klassisen abraasion muokkautumismekanismeja. [20]

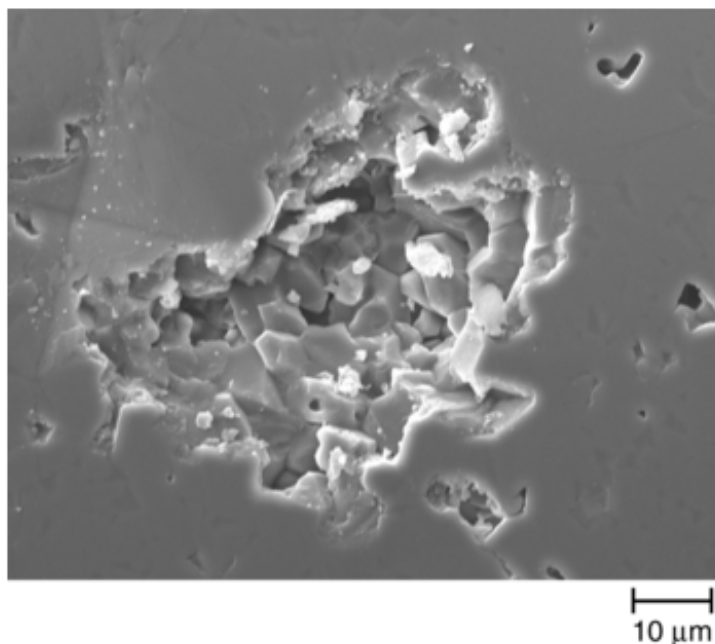
Asiaa voidaan tarkastella myös energiahäviön avulla. Tällöin metallimateriaali voi absorboida iskuenergian elastisesti, plastisesti tai murtumalla. Materiaalin kyky absorboida energiaa plastisesti ilman materiaalihäviötä on suoraan kytköksissä sen kavitaationkestoon. Kavitaation vauriotyyppiin vaikuttaa huomattavasti muodonmuutosnopeuden vaikutus materiaalin muokkautumiseen. Kavitaation on käytännössä huomattu tuottavan kahden tyyppistä vauriotyyppiä, sitkeille ja hauraille materiaaleille molemmille omansa. Suurimmalla osalla koneenrakennusmetallimateriaaleista, jotka eivät ole erityisen herkkiä muodonmuutosnopeuksille, on kulumisen havaittu tapahtuvan sitkeän vauriotyyppin mukaisesti. Tämä on esitetty kuvassa 28. [20]



Kuva 28. Kuparipohjaisen seoksen kavitaatiolle altistunutta kulutuspintaa öljytyssä vaihdelaatikossa. [20]

Pintakeskeiset kuutiolliset metallit (PKK) eivät yleensä ole erityisen herkkiä eri muodonmuutosnopeudelle, joten niiden kavitaatiokäyttäytyminen on samankaltaista niiden staattisen mekaanisen käyttäytymisen kanssa. Pääosan vahingoista aiheuttavat plastinen muodonmuutos tai sitkeän tyyppiset repeämät, joista voidaan syyttää lähellä pintaa tapahtuneita microjet -iskuja. Tilakeskeisillä kuutiollisilla metalleilla (TKK) muodonmuutos on enemmän riippuvainen muodonmuutosnopeudesta. Siksi niiden käyttäytyminen kavitaatiotilanteissa on aina muokkautumisen ja murtumisen välistä kilpajuoksua. Puhtaan raudan altistuessa kavitaatiolle sen käytös on yhtä aikaa haurasta ja sitkeää. Muodonmuutosnopeudella saattaa myös olla vaikutusta altistettaessa heksagonaalisen tiivispakkaus-rakenteen omaavia metalleja kavitaatiolle. Useampifaasisien seosten kanssa faasien koko ja jakautuminen seoksessa saattavat vaikuttaa kavitaatiomekanismeihin. [20]

Vauriomekanismiltaan käyttäytyvät hauraasti sellaiset materiaalit, kuten keraamit ja pleksilasi (polymetyylimeta-akrylaatti, PMMA), joilla on heikko kyky absorboida iskun aiheuttamaa energiaa. Kuvassa 29 on esimerkki tällaisesta. Materiaalihäviötä aiheuttaa säröjen eteneminen materiaalin pinnassa tai raerajoilla. Tässä tapauksessa suurin osa iskuenergiasta kuluu säröjen ydintymiseen, joka entisestään edesauttaa materiaalin irtoamista. Saman materiatilavuuden irrottamiseen tarvittava absorboituva energiamäärä on haurailla materiaaleilla huomattavasti sitkeitä vähäisempi. Tästä syystä hauraat materiaalit eivät kestä kavitaatiota sitkeiden materiaalien veroisesti. [20]

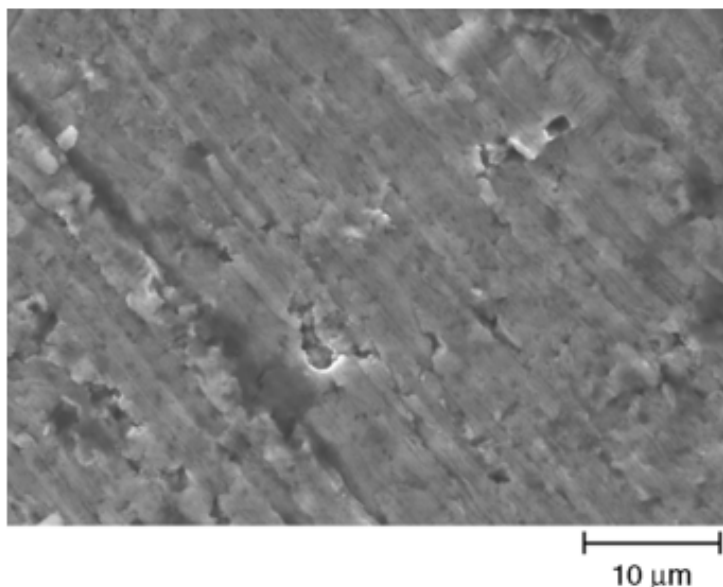


Kuva 29. Vibratorisen kavitaatiokokeen vaurioittamaa Al_2O_3 kulumispintaa. [20]

2.4.4 Kavitaatioeroosiokulumisen eri vaiheet

Kavitaatioeroosion kehittyminen riippuu useista parametreista, kuten materiaalista, pinnasta, muodosta, nesteestä ja kavitaatio-olosuhteista. Ei ole olemassa universaalia kaavaa eroosionopeuden (materiaalihäviö per aikayksikkö) kehittymiselle kavitaatiolle altistumisen aikana. Suurimmassa osassa tapauksista vähäistä materiaalihäviötä on havaittavissa jo kavitaation alkuvaiheessa (itämisaika, inkubaatiovaihe). Tätä vaihetta seuraa usein eroosionopeuden huomattava kasvu (kasaantumis/akkumuloitumisvaihe) tai vakiintunut eroosionopeus (tasaantumisvaihe). Useasti tämän jälkeen on vielä havaittavissa eroosionopeuden lasku (vaimenemisvaihe). [20]

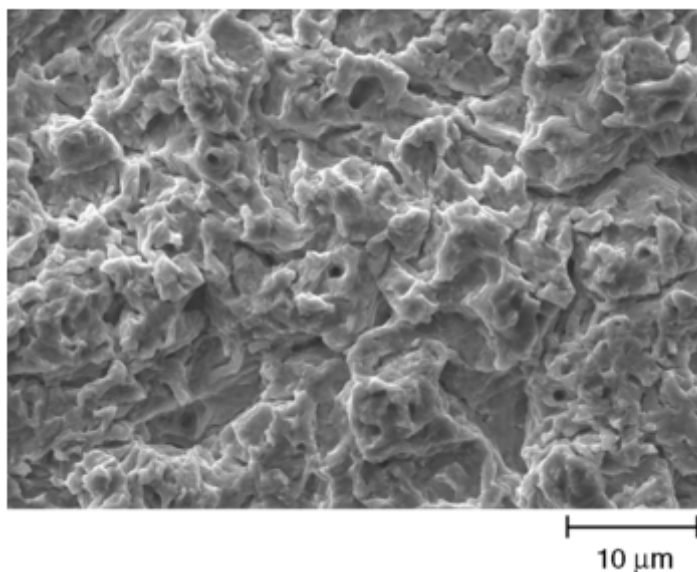
Inkubaatiovaiheessa materiaalihäviö on yleensä huomaamattoman pieni. Suurimmalla osalla metalleista iskuenergia kuluu pinnan elastiseen muodonmuutokseen, plastiseen muodonmuutokseen tai säröilyyn. Joidenkin metallien pinta saattaa myös muokkauslujittua. Pinnassa saattaa näkyä erilaisia muutoksia, kuten plastista virtausta, painaumajälkiä, aaltoilua, raerajojen esiin tulemistä, karkeita liukunauhoja tai murtumista, kuten kuvasta 30 käy ilmi. Tämän periodin keston määrittely riippuu punnitsemistarkkuudesta. Siksi se onkin koko systeemistä riippuva, eikä niinkään itse materiaalin ominaisuus. Ei ole järkevää vertailla eri tyyppisten kokeiden tai käytännön sovelluksissa eri koneiden inkubaatiovaiheiden kestoja. [20]



Kuva 30. Vibratorisen kavitaatioeroosiokokeen inkubaatiovaihe Ti-6Al-4V:lle. [20]

Akkumuloitumisvaihe; Jatkuva plastinen muokkautuminen ajaa metallin muokkauslujittumisen huippuunsa. Tästä vielä jatkuva plastinen muokkautuminen johtaa materiaalin irtoamiseen ja säröjen etenemiseen pinnan läheisyydessä, mikä kiihdyttää materiaalihäviötä. Kuluva pinta muuttuu karheammaksi ja siihen tulee suuri määrä pieniä kuoppia ja syviä kraattereita. Kuva 31 esittää tällaista tilannetta. [20]

Tasaantumisvaihe; Eroosionopeus voi pysyä entisellään tai kasvaa, riippuen materiaalin tyypistä ja kavitaatio-olosuhteista. Kraatterit ja kuopat eivät liity millään tavalla materiaalin ominaisuuksiin, raerajoihin, liukunauhoihin tai mihinkään muuhun rakenteelliseen ominaisuuteen. Tämän vaiheen ajallinen kesto riippuu materiaalin kavitaation kestosta. Pinnan morfologia ei sanottavasti muutu tämän vaiheen aikana. Materiaalihäviö voi olla joillain materiaaleilla, kuten alumiinilla, hyvinkin suurta.



Kuva 31. 304 ruostumattoman teräksen vaurioitunutta kulumispintaa vibratorisen kavitaatiokokeen jälkeen. [20]

Vaimenemisvaihe; Vaimenemisvaiheen eroosionopeuden pieneneminen riippuu monista tekijöistä, kuten materiaalin ominaisuuksista sekä nestevirtauksen ja kuluvan pinnan vuorovaikutuksien mukautumisprosessista. Jäännösilma tai jäännöskaasukuplat syvällä kraattereissa voivat toimia eräänlaisina tyynyinä ja imeä itseensä osan iskuenergiasta. Vaimenemisvaiheessa oleva pinta on laajentuneine kraattereineen yleensä karheampi. Tämä kavitaatiokulumisen vaihe ilmenee vain tietyissä olosuhteissa. Vibratoristen kavitaatiokokeiden aikana (ASTM G 32) kunnollista vaimenemisvaihetta ei ole tavattu alumiiniseoksilla, kupariseoksilla, hiiliteräksillä, ruostumattomilla teräksillä ja titaaniseoksilla. [20]

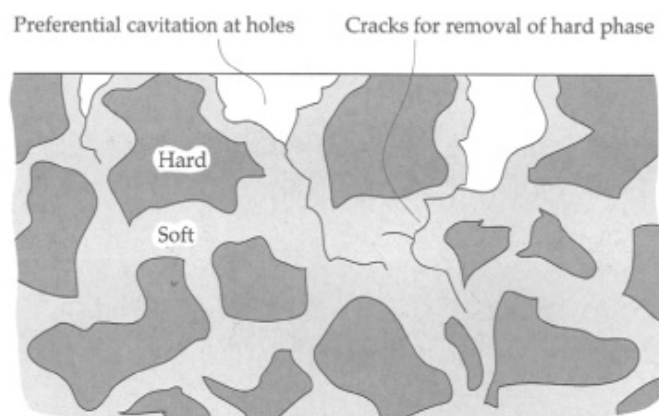
2.4.5 Mikrorakenteen ja raekoon vaikutus kavitaation kestoon

Metallin mikrorakenteella on huomattava vaikutus kavitaation kestoon. Austeniittisen ruostumattoman teräksen pieni raekoko lisää pinnan tiivyyttä raerajoilla. Se vaikuttaa metallin kavitaation kestoon huomattavasti, sillä raerajat antavat materiaalille sen tarvitseman ensisijaisen tukimekanismin tämän tyyppiselle kulumiselle. Tästä syystä hienorakeiset teräsnäytteet kuluvat yleensä suurempirakeisia teräsnäytteitä vähemmän. [20]

Kyky kestää kavitaatioeroosiota ja materiaalin mekaaniset ominaisuudet liittyvät toisiinsa useiden ominaisuuksien kautta. Näitä ominaisuuksia ovat mm. materiaalin kovuus sekä sen myötö- ja vetolujuus. Austeniittisillä teräksillä kavitaatioeroosion kesto lisääntyy raekoon pientymisen myötä. Tämän hetkisen tiedon perusteella näyttäisi siltä, että kaikki materiaalin mekaaniset ominaisuudet vaikuttavat jollakin lailla sen kavitaatioeroosion kestokykyyn. On kuitenkin mahdotonta sanoa, mikä mekaanisista parametreista antaisi eniten suojaa kavitaatioeroosiota vastaan. [20]

Kavitaatiota kestävä materiaalin valintaan vaikuttaa ensisijaisesti kavitaatiolle altistuvan komponentin fyysinen koko. Kavitaatiota voi esiintyä komponenteissa, joiden kokoluokka vaihtelee laivan potkureista aina patojen patoaukkoihin. Suuren mittaluokan komponenteissa on yleisesti käytetty teräsbetonia, polymeerikuiduilla kyllästettyä betonia ja epoksilla pinnoitettua betonia. Materiaali, jolla on erittäin hyvä kavitaation kesto, on kumi, koska sen erittäin pieni kimmomoduuli mahdollistaa kuplien luhistumisesta syntyvien iskuenergioiden vaarattoman dissipititaation. Kumi ei kuitenkaan enää kykene toimimaan äärimmäisissä kavitaatiotapauksissa. Joihinkin käyttökohteisiin, kuten esim. korkeisiin käyttölämpötiloihin, kumi ei käy. Epoksihartseja käytetään myös kavitaatiolle altistuvien komponenttien pinnoittamiseen, mutta äärimmäisiin kavitaatio-olosuhteisiin nekin eivät sovellu. [5, s. 544]

Yksi kavitaation perusominaisuuksista on sen taipumus käydä valikoivasti käsiksi materiaalin kimppuun ja valita kohteekseen heikoin faasi. Esimerkkinä tästä voidaan käyttää valuraudan grafiittisulkeumia kavitaatiokulumisen aikana. Grafiittisulkeumat tarjoavat kavitaatiokulumiselle kohdan murtumien ydintymiselle, jota tarvitaan nopean kulumisen mahdollistavalle hauralle murtumismekanismin. Samankaltainen ilmiö on myös havaittu keraamimetalleilla (cermet), joissa on kovia volframikarbideja pehmeämmässä matriisissa. Kavitaatio pystyy näin hiljalleen irrottamaan volframikarbidin matriisista. Tästä syystä volframikarbidimateriaalien kavitaation keston parantaminen riippuu enemmänkin sidosaineen, matriisin, ominaisuuksien parantamisesta eikä niinkään volframikarbidien ominaisuuksien kehittämisestä. Kavitaatiota kestäville materiaaleille on yhtenäinen ja tasainen mikrorakenne, ja niiden eri faaseilla on samankaltaiset mekaaniset ominaisuudet. Monifaasisen materiaalin kavitaatiokulumismekanismi on esitelty kuvassa 32. [5, s. 544]



Kuva 32. Kavitaation ensisijaisesti mikrorakenteeltaan heikoimman faasin vaurioitumista. [5, s. 544]

Rautametalleista ruostumattomat teräkset kestävätkä kavitaatiota valurautoja paremmin. Seostamattomia hiiliteräksiä käytetään harvemmin kavitaation kestoja vaativissa koh-

teissa, koska suurin osa kavitaatioilmiöistä tapahtuu vedessä. Ruostumattomilla teräksillä ferriittifaasi on austeniittista faasia heikompi. Martensiittisen faasin kavitaation kesto on näistä kolmesta laadusta kaikkein paras. [5, s. 544]

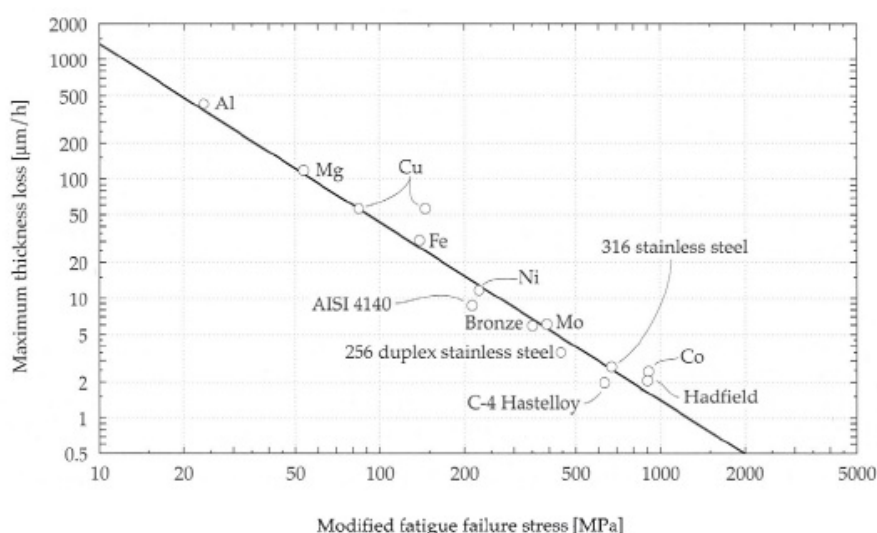
Austeniittisten kromi-mangaani-typpi (Cr-Mn-N) ruostumattomien teräksien on havaittu kestävän kavitaatiota perinteisiä kromi-nikkeli-molybdeeni (Cr-Ni-Mo) seosteisia ruostumattomia teräksiä paremmin. Tämän lisäksi mangaaniseostuksen korvaaminen tyypellä alentaa ruostumattoman teräksen hintaa. Yleisesti myös uskotaan, että austeniittisen (mutta ei ferriittisen) Cr-Mn-N ruostumattoman teräksen työstökarkenemistaipumus parantaa kesto-ominaisuuksia kavitaatiokulumista vastaan. Hadfield -teräksillä tai mangaaniteräksillä on austeniittisista teräslajikkeista kaikkein paras kavitaation kesto. Viimeaikoina kehitetyistä materiaaleista korkeatyyppiset austeniittiset teräkset (high-nitrogen austenitic steels, HNAS) tarjoavat erittäin lupaavia kavitaation kesto-ominaisuuksia. HNAS:lle on tunnusomaista niiden matala hiilipitoisuus ja yli 0,4 %:n tyypipitoisuus. Niiden mekaanisissa ominaisuuksissa yhdistyvät suuri myöstölujuus hyvään muokattavuuteen ja sitkeyteen. HNAS -terästen huomattava kyky kestää kuplien luhistumisesta aiheutuvia iskuja juontuu niiden erittäin voimakkaasta muokkauskovetumistaipumuksesta. [5, s. 544 - 545]

Kohteissa, joissa on pakko käyttää valurautoja, kuten esimerkiksi sisäsyntereissä, tulisi ensisijaisesti minimoida vapaan hiilen määrää ja toissijaisesti vapaiden karbidien määrää tulisi vähentää. Enin osa keraamimateriaaleista näyttäisi olevan riittämättömän sitkeitä, ja sen tähden ne eivät omaa erityisen hyviä kavitaation kesto-ominaisuuksia, vaikka ne ovatkin erittäin kovia materiaaleja. Laakerimetallit ovat kavitaation kestoaltaan laskevassa järjestyksessä seuraavasti: lyijypronssit, tinapohjaiset valkometallit, Cu-Pb seokset ja lyijy-pohjaiset valkometallit. Järjestyksen määrittelevänä tekijänä on lyijy matriisimetallina. Lyijyllä on erittäin heikko kavitaation kesto johtuen sen pehmeystestä. Ei-rautametallien kavitaation kestoalta on olemassa hyvin rajoitetusti tutkimustietoa. Korroosiota hyvin kestäväillä titaaniseoksilla on samankaltaiset kavitaation kesto-ominaisuudet kuin ruostumattomilla teräksillä. Erittäin pahalle kavitaatiolle altistuvissa kohteissa koboltiseokset, kuten stelliitit, ovat hyvin käyttökelpoisia materiaaleja. Samaan hengenvetoon on kuitenkin huomautettava, että koboltti kestää kavitaatiokulumista eroosiokulumista paremmin. [5, s. 545]

Sitkeät materiaalit muokkautuvat plastisesti altistuessaan kavitaatiolle, ja plastisen muokkautumisen avainominaisuudet ovat dynaaminen elpyminen ja muokkauslujittuminen. Korkean pinousvikaenergian (Stacking Fault Energy, SFE) materiaalit kykenevät nopeaan dynaamiseen elpymiseen ja heikkoon muokkauslujittumiseen. Ainakin alfa-alumiinipronssilla SFE on käänteisesti verrannollinen niiden kavitaation kestoalta. Tämä viittaa siihen, että alfa-alumiinipronssilla plastinen muokkautuminen kuplien luhistuksessa on merkittävää, eikä kaikki kuplien luhistumisesta tullut energia täysin kulu plastiseen muodonmuutokseen. [5, s. 545]

Yksi perustavaa laatua oleva ominaisuus kavitaatiokulumisessa on sen väsymistyyppinen vaurioprosessi. Se avulla on mahdollista suorittaa käyttökelpoisia vertailuja eri metallien välillä perustuen metallien väsymisteoriaan. On myös huomattu, että kavitaationopeudet tietyillä puhtailla metalleilla korreloivat hyvin kestoraja-parametrin kanssa. Kestoraja-parametri on nollasyklin kohdalla olevan nimellisen väsymismurtumajännityksen ja plastisen muodonmuutoksen synnyttämän jännityksen kasvun eksponentin välinen tulo.

Nimellinen väsymisjännitys nollasyklin kohdalla on löydetty ekstrapoloimalla kokeellisesti saadusta väsymisdatasta. Puhtaiden materiaalien kavitaatiokulumisen kesto voidaan ilmaista termeillä maksimi materiaalihäviön paksuus sekä muokattu väsymismurtumajännitys. Näiden välinen suhde voidaan esittää kokeellisiin mittauksiin perustuvien tietojen avulla, kuten kuvassa 33 on tehty. [5, s. 545]



Kuva 33. Maksimi materiaalihäviön paksuus sekä muokatun väsymismurtumajännityksen suhde ilmaistuna kavitaatiokulumiskestona. [5, s. 546]

Kuvasta 33 voidaan havaita, että metallit, joilla on heikot väsymisen kesto-ominaisuudet, omaavat yleisesti ottaen myös heikot kavitaatiokesto-ominaisuudet. Tämä ei tosin tarkoita suoraan myöskään sitä, että parantamalla metallin väsymisen kesto myös kavitaationopeus alenisi. [5, s. 545]

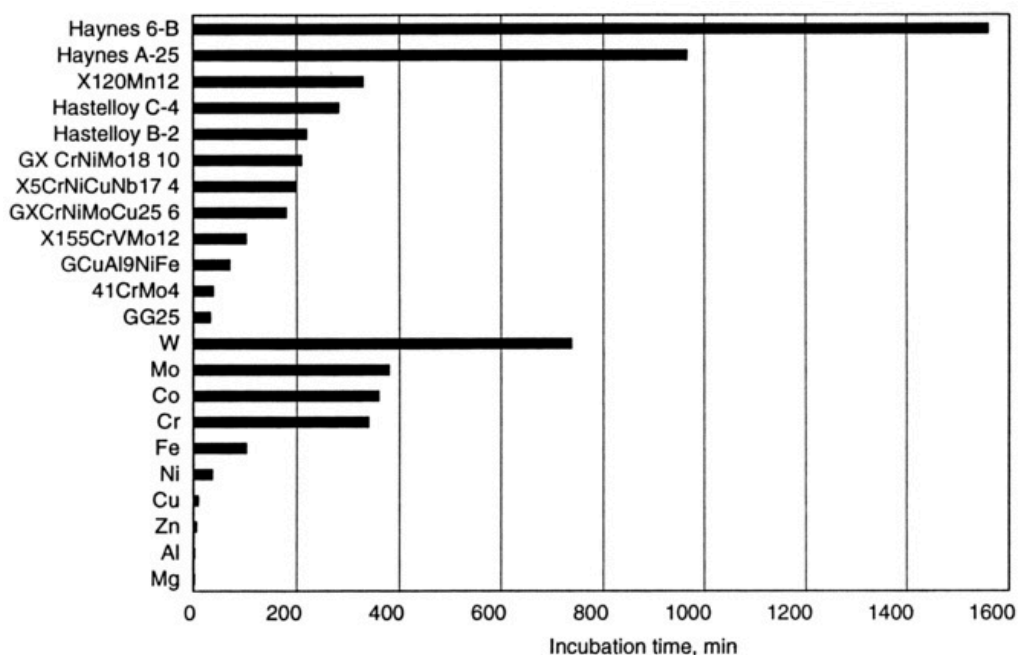
2.4.6 Materiaalien kavitaation kesto ja siihen vaikuttavat tekijät

Kavitaatiovaurioita torjuttaessa materiaalien kavitaation kestävyys nousee usein keskeiseen asemaan. Kavitaatiokulumisen välttämiseksi materiaali-insinöörin luontainen reaktio on alkaa etsiä käyttökohteeseen parempia materiaaleja. Materiaalitieteilijät ponniste-

levat yrityksissään kehitellä uusia materiaaleja, erityisesti pintakäsittelyitä ja pinnoitteita, jotka vastaavat näihin tarpeisiin. Kavitaation kesto ei kuitenkaan ole pelkästään vain materiaalin ominaisuuksista riippuva asia, vaan se on koko systeemin vaste. Materiaalin ominaisuuksien (kuten kompositio, rakenne, lämpökäsittelyt, geometria, pinnankarheus, jäännösjännitykset, jne.) lisäksi kavitaation kestoon vaikuttaa olennaisesti nesteen ominaisuudet, virtausnopeus, vibraation luonne, lämpötila, hydrostaattinen paine ja niin edespäin. Joidenkin materiaalien kavitaation kesto on riippuvainen niiden kovuudesta, mutta suurimmalla osalla metallimateriaaleista se kytkeytyy tiukimmin väsymislujuuteen. Siksi onkin erittäin hankalaa esittää materiaalinvalintaan yksikäsitteistä kaavaa, jonka avulla kavitaatiovauriot saataisiin mahdollisimman pieniksi. [22]

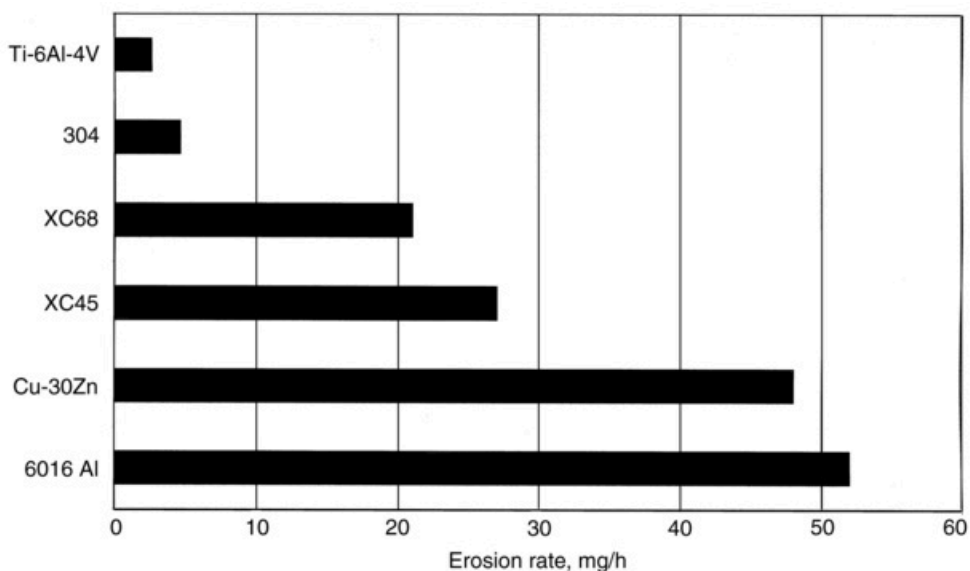
Ehdolla olevista materiaaleista on yleensä saatavilla laboratoriokoetuloksia käytännön sovellusten kavitaation keston arviointiin. Kokeiden simuloimissa riittävän hyvin käyttökohteen olosuhteita testidata saattaa olla erittäinkin käyttökelpoista sopivinta materiaalia valittaessa. Viimeisimpien tutkimusten koetulokset saattavat antaa myös uusia ajatuksia materiaalinvalintaa silmällä pitäen. Laboratorioissa käytetyt kokeet eroosio- ja kavitaatiovaurioiden simuloimiseen metalleilla voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: suuren virtausnopeuden kokeet, kuten venturiputket, pyörivät levyt ja kanavat, joiden kavennukseen näyte asetetaan, korkean taajuuden vibratoriset kokeet, joissa käytetään magnetostriktio- tai pietsosähköisiä laitteistoja sekä törmäävät nestesuihkukokeet, joissa käytetään joko paikallaan pysyviä tai pyöriviä näytteitä, jotka altistetaan suuren nopeuden nestesuihkulle tai pisaroiden iskuille. Nämä kokeet on yleisesti ottaen suunniteltu tuottamaan suurta eroosiointensiteettiä pienille kappaleille verrattain lyhyessä ajassa. Ne eivät välttämättä simuloi tarkalleen käytönaikaisia olosuhteita, mutta ne ovat usein silti käyttökelpoisia työkaluja materiaalivertailuja tehtäessä. [22]

Koneenrakennuksessa käytetään monenlaisia eri metalleja ja metalliseoksia, joilla kaikilla on erilaiset kavitaation kesto-ominaisuudet. Voimakkaasti yksinkertaistettuna voidaan sanoa, että kovilla materiaaleilla on hyvä kavitaation sietokyky, vaikkakin kovuus, varsinkaan metalliseoksilla, ei ole aina hyvä indikaattori kavitaation kestosta. Kuvassa 33 on esitelty eräitä puhtaita metalleja ja joitakin markkinoilla olevia metalliseoksia, joille suoritettiin vibratorinen kavitaatiokoe. Näyte oli 0,9 mm:n etäisyydellä vibraattorin kärjestä. Kuvan mukaan volframi, molybdeeni, koboltti ja niiden seokset ovat huomattavasti kavitaatiota kestävämpiä kuin magnesium, alumiini, sinkki, kupari, nikkeli sekä rauta ja sen seokset. [22]



Kuva 34. Eri metallien ja seosten inkubaatioaikoja (frekvenssi 21.1 kHz; näytteen etäisyys vibraattorin kärjestä 0.9 mm, värinän amplitudi 35 μm , lämpötila 20 °C, nesteinä vesi). [22]

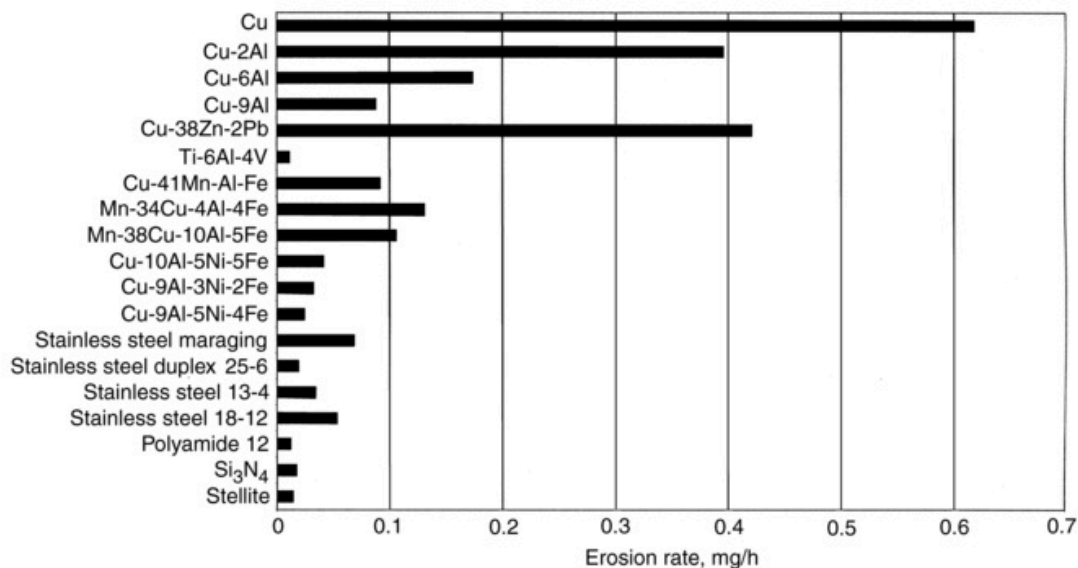
Kuvassa 35 on samanlainen taulukko näytteiden ollessa kiinnitettynä suoraan vibraattorin kärkeen, mutta nyt kavitaatiokulumista on arvioitu tasaantumisvaiheessa (materiaalivaihe per aikayksikkö, mg/h). [22]



Kuva 35. Eri metallien ja seosten eroosionopeuksia. (frekvenssi 20 kHz, näyte kiinnitetty suoraan vibraattorin kärkeen, värinän amplitudi 50 μm , lämpötila 20 °C, nesteinä tislattu vesi). [22]

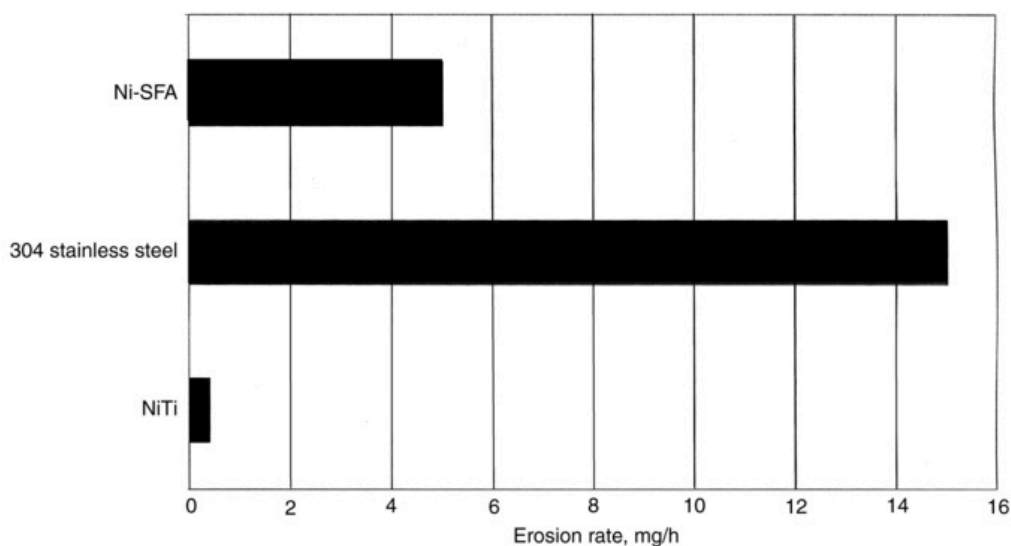
Kuvassa 36 on vertailtu suurta määrää eli materiaaleja pyörre-eroosiolaitteen avulla.

Kuvan mukaan hyvän suojan kavitaatioeroosille antoivat mm. stelliitit, polyamidi 12 ja Ti-6Al-4V. [22]



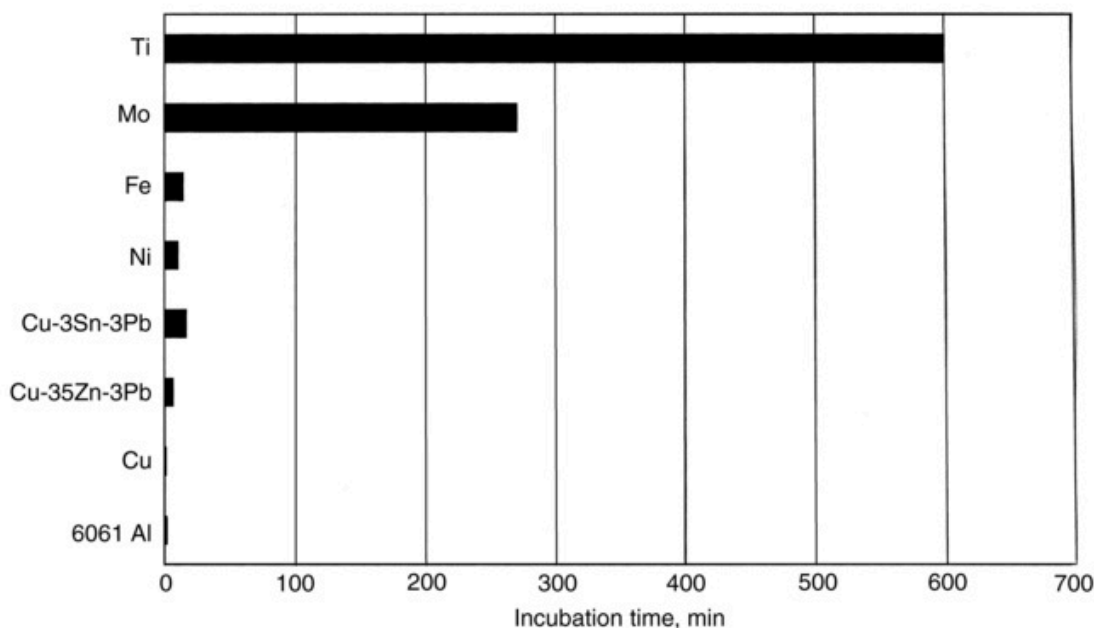
Kuva 36. Eri materiaaleja vertailtuna pyörre-eroosiolaitteen avulla (tulopaine 7.7 bar, ulostulopaine 1 bar, virtaus 3.3 mm³/h, tulonopeus 18 m/s, rotaationopeus 400 kierrosta/min, nesteinä tislattu vesi, lämpötila 20 °C). [22]

Tuloksien mukaan NiTi omaa erittäin hyvän kyvyn kestää kavitaatiota. Kuten kuvasta 37 käy ilmi, 3 %:ssa NaCl nesteliuoksessa NiTi:n eroosionopeus voi olla 38 kertaa 304 ruostumattoman teräksen eroosionopeutta pienempi. [22]



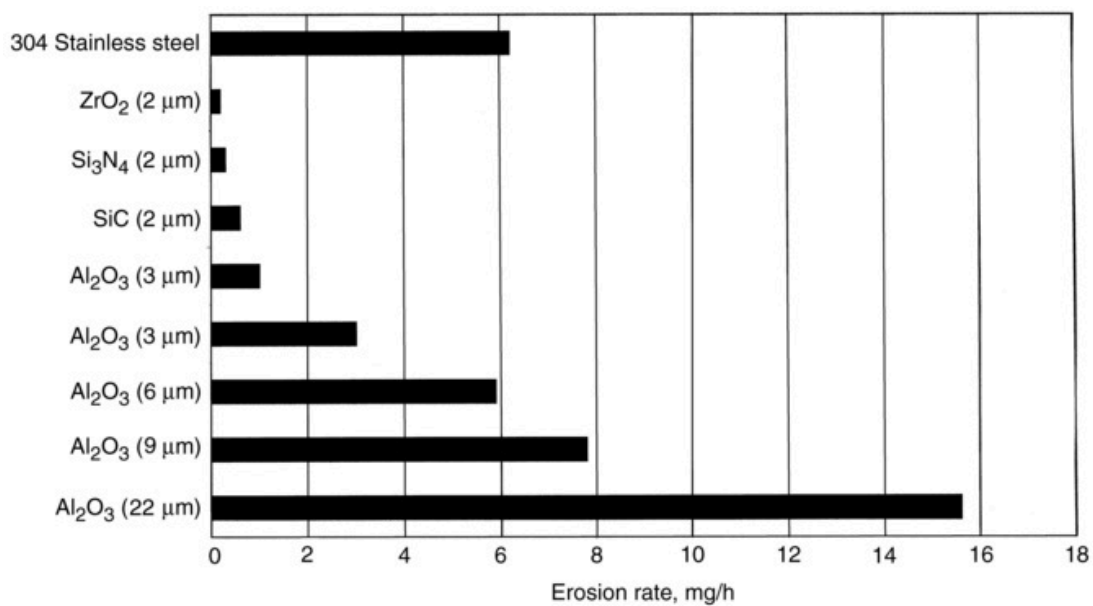
Kuva 37. NiTi:n, 304 ruostumattoman teräksen ja nikkeli-pohjaisen seoksen eroosionopeuksia. (frekvenssi 20 kHz, näyte asennettu vibraattorin kärkeen, värinän amplitudi 50 μm, lämpötila 20 °C, nesteinä 3.5 %:n NaCl liuos). [22]

Nestemäisissä olosuhteissa toimivat hydraulikan komponentit altistuvat kavitaatiolle. Kuitenkin yhä suurempi määrä kavitaatio-ongelmista kohdataan tiiviste- ja voitelujärjestelmissä, jotka toimivat öljyssä. Koetulokset osoittavat haurailta materiaaleilla olevan yleisesti ottaen suuremmat eroosionopeudet kuin sitkeillä materiaaleilla. Titaaniseoksilla on havaittu olevan pitkäkestoinen inkubaatiovaihe ja merkittävä vaimenemisvaihe. [22]



Kuva 38. Metallien eroosionopeus mineraaliöljyssä (frekvenssi 20 kHz, näyte kiinnitetty vibraattorin kärkeen, värinän amplitudi 50 μm , nesteinä mineraaliöljy, viskositeetti 20 $^{\circ}\text{C} = 110 \text{ cS}$). [22]

Keraameja käytetään usein hydraulisten laitteiden komponenttien ja venttiilien rakennusmateriaaleina niiden erinomaisten korroosio-, abraasio- ja kiinteiden partikkelien eroosion kesto-ominaisuuksiensa johdosta. Ne voivat kuitenkin olla haavoittuvia kavitaatioeroosiolle. Toiset keraamilaadut ovat muita herkempiä kavitaatiolle kuin toiset. Koetulokset osoittavat, että taivutuslujuudella ei ole merkittävää vaikutusta kavitaation kestoon. Kavitaatioeroosion kesto riippuu pääsääntöisesti keraamin mikrorakenteesta, kuten raekoosta, huokoisuudesta ja rei'istä materiaalissa. Kuva 39 esittelee raekoon vaikutusta kavitaation kestoon. Microjet -iskut johtavat raerajamurtumiin alumiinioksidin pinnan materiaalivirheiden ympärillä, mikä taas johtaa raepartikkelin irtoamiseen. Alumiinioksidin kavitaatioeroosion kestoa voidaan parantaa pienentämällä materiaalin raekokoa. [22]



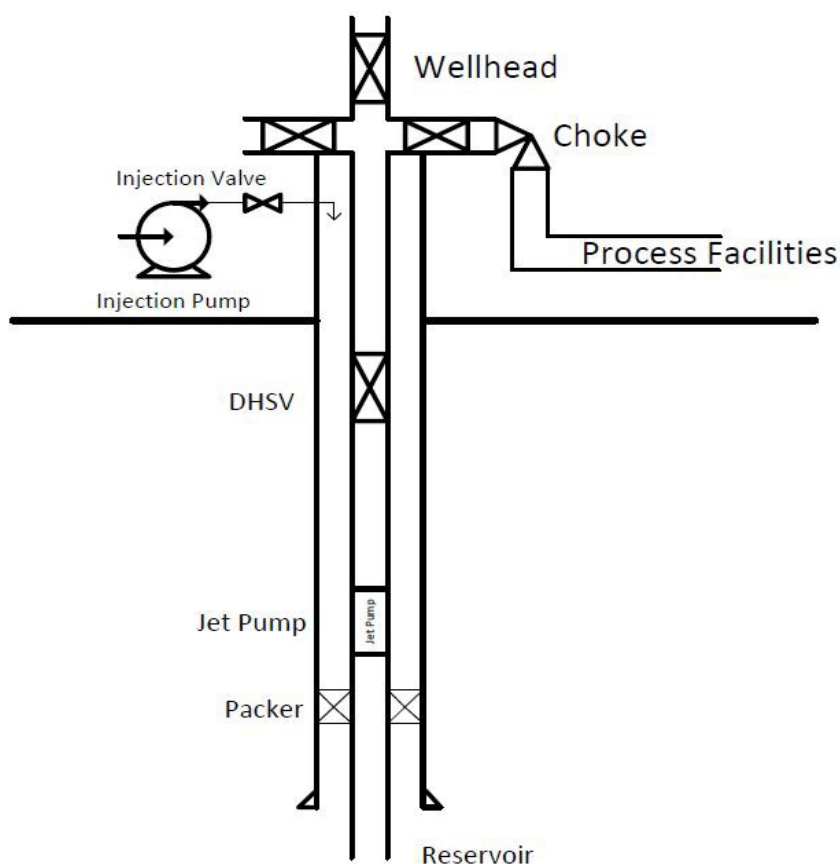
Kuva 39. Raekoon vaikutuksia keraameilla eroosionopeuteen (frekvenssi 20 kHz, matka näytteeseen vibraattorin kärjestä 1 mm, värinän amplitudi 50 μm, lämpötila 25 °C, nesteenä ionivaihdettu vesi). [22]

3 KOMPONENTIT JA NIIDEN TOIMINTA

Tässä kappaleessa esitellään jet pump -laitteistoa, sen komponentteja ja niille asetettuja vaatimuksia. Myös materiaalivalinnan vaatimuksia sekä vaatimukset täyttäviä seoksia sekä eräitä pinnoitteita käsitellään tässä kappaleessa.

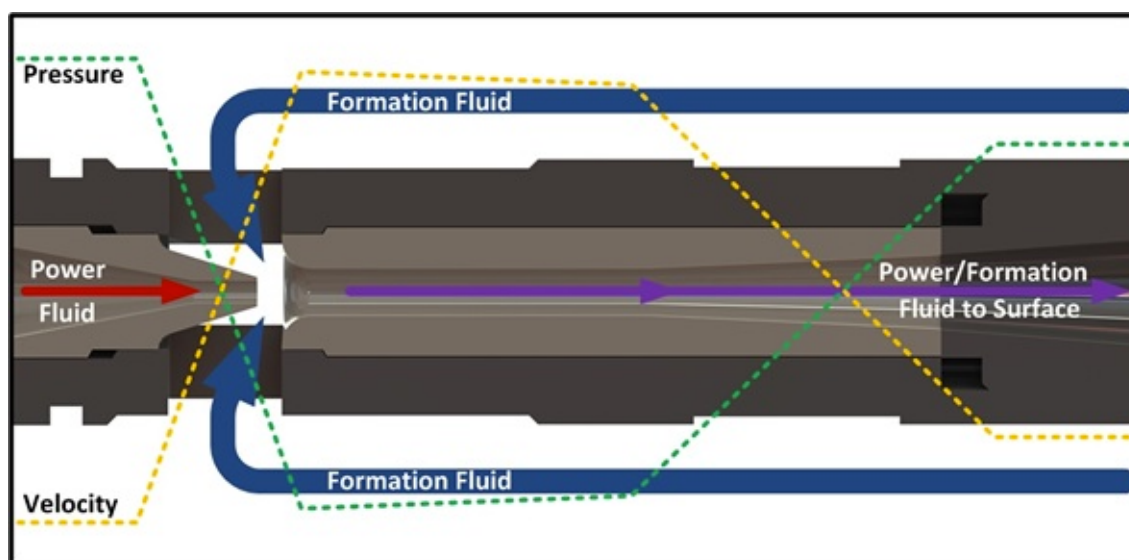
3.1 Jep pump -laitteisto

Jet pump -laitteiston pääkomponentteja ovat suutin, sekoitinputki, Carrier -runko, bottom nut ja housing -kotelo. Laitteiston toimintaa esitellään vain pintapuolisesti menemättä sen tarkemmin yksityiskohtiin. Kuvassa 40 on esitelty koko laitteisto pumppuineen ja tarvittavine koneistoineen. Jet pump sijoitetaan kaivoon hyvin lähelle maanalaista öljylähdettä.



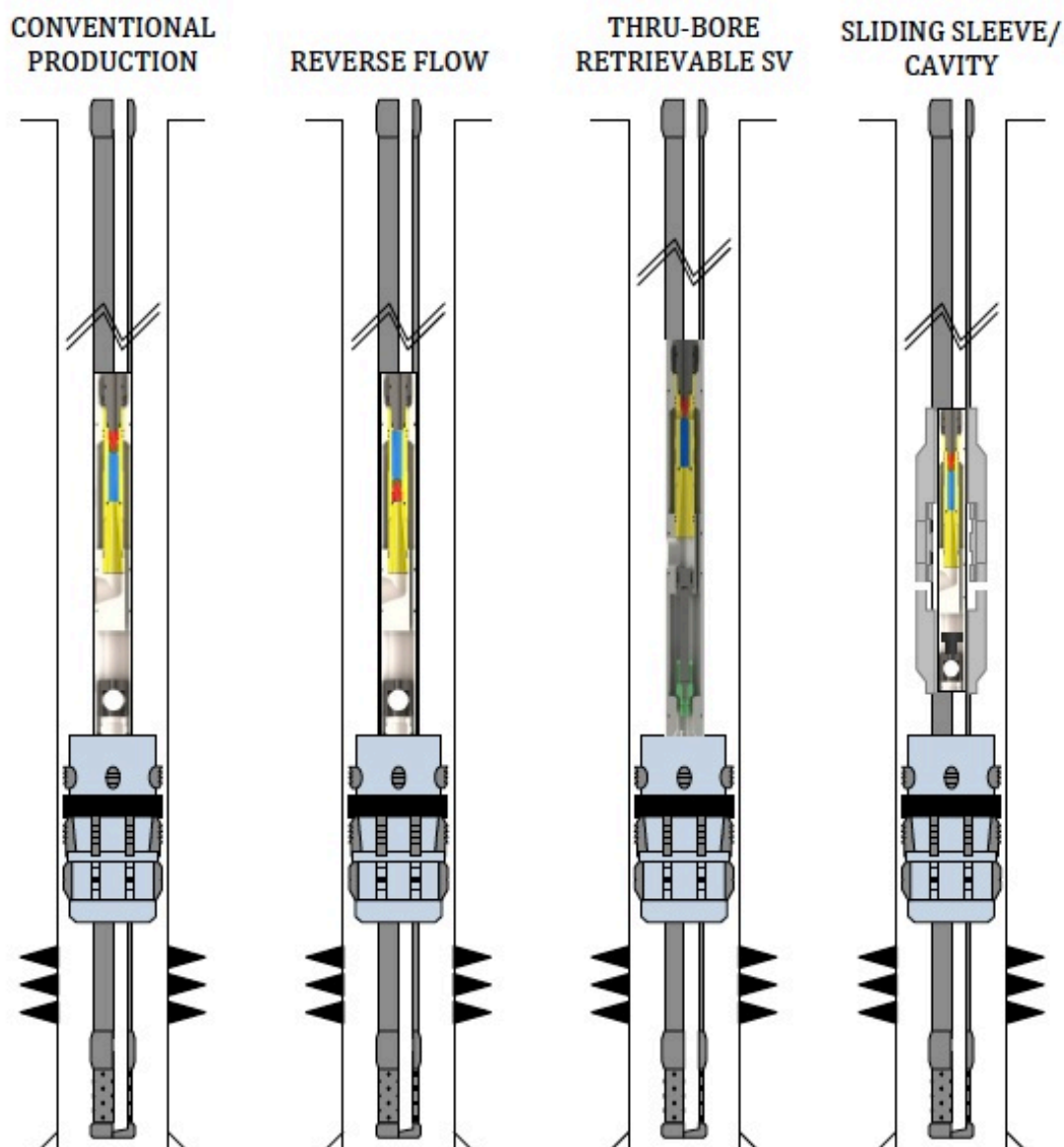
Kuva 40. Kaivon koko laitteisto sisältäen jet pump:n. [25 s. 8]

Jet pump:t ovat yksinkertaisia laitteita, kuten kuvasta 41 käy ilmi. Jet pump koostuu neljästä staattisesta osasta, joita ovat suutin (nozzle), nielun tuloaukko (throat inlet), nielu (throat) ja diffuusori (diffuser). Korkeapaineinen työneste (power fluid) muutetaan kineettiseksi energiaksi sen mennessä suulakkeen läpi. Paljon matalammassa paineessa oleva esiintymän neste (reservoir fluid) kiihdytetään nieluun. Nesteet sekoittuvat nielussa ja homogeeninen seos syntyy diffuusorissa. Yhdistyneiden nesteiden kineettinen energia muunnetaan takaisin paine-energiaksi diffuusorissa. Pumpussa syntynyt paineen kasvu nostaa seoksen maan pinnalle. [25, s. 3]



Kuva 41. Jet pump:n halkileikkaus ja toimintaperiaate. [26]

Kaikki jet pump:t eivät tietenkään ole samanlaisia, sillä valmistajia on useita. Tässä työssä saadut havainnot ja kokemukset painottuvat lähinnä Tech-flo:n pumppukonstruktion. Kuvassa 42 on esitelty heidän erilaisia jet pump -mallejaan. Näistä malleista tutkitaan lähinnä ensimmäistä varianttia.



Kuva 42. Tech-flo:n erilaisia jet pump-malleja. [26]

Jet pump:ia operoidaan yleensä kahdella eri tavalla.

Reversed Fluid Circulation:ssa työneste pumpataan annulus-tilan läpi ja nesteiden sekoittuminen tapahtuu pinnalle johtavassa öljyputkistossa.

Forward Fluid Circulation:ssa työneste pumpataan annulus-tilan läpi ja nesteiden sekoittuminen tapahtuu annulus-tilan läpi.

Molemmissa tapauksissa työnesteen ajava energia koostuu kineettisestä ja potentiaalienergiasta. Kineettinen energia liittyy kiertonopeuteen (circulation rate) ja potentiaalienergia suulakkeen sisääntulopaineeseen. Jet pump:n työskentelysyvyudessa suulakkeeseen saapuvalla työnesteellä on molempia, eli siis kineettistä ja potentiaalienergiaa. Työneste saapuu jet pump:iin suulakkeen kautta. Tämä virtauksen kuristus aiheuttaa

paineen alentumista ja näin potentiaalienergia muuttuu kineettiseksi energiaksi. Suuttimen kautta virtaava työ neste purkautuu nieluun suurinopeuksisena suihkuna. Nielun tuloaukossa työ neste sekoittuu esiintymän nesteiden kanssa. [25, s. 5 - 6]

Yleensä öljynporausjärjestelmän muiden komponenttien elinikä on jet pump:n vastavaa lyhyempi. Jet pump:n hyviä puolia muihin menetelmiin nähden ovat muun muassa turvallisuus, pitkät käyttöajat, hyvä saanti, paine järjestelmässä, taloudellisuus ja käyttöikä. Kuvassa 43 on esitelty eri kohteissa olleiden jet pump:ien elinikää (run time). [25, s. 9]

Operator	Location	Field	Run time (Years)	Well
Marathon	Alaska	McArthur River	2	D-4RO
Tenneco	GoM	Main Pass	1.5	A5
AGIP	Italy	Vega	2	3 Off
Lundin	Tunisia	Oudna	5.3	1
BP	UK	Thistle	0.9	A51
Shell	UK	Auk	2	Several

Kuva 43. Jet pump:n käyttöikä. [25, s.9]

Kuten kuvasta käy ilmi, eliniät vaihtelevat hyvinkin paljon. Käyttöikään vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi käytetyt paineet, käyttöaste, öljyn viskositeetti, käyttölämpötilat sekä epäpuhtaudet öljyn joukossa. Tavoitteena tietysti olisi, että jet pump kestäisi koko laitteen käyttöajan ilman käyttökatkoja. Käytännössä tämä tarkoittaa noin viiden vuoden käyttöaikaa. [27]

3.1.1 Suutin

Suutin on valmistettu volframkarbidiseoksesta. Mikrorakennetta tai tarkempaa materiaalin seostusta ei tiedetä. On arveltu, että seoksessa olisi ehkä 5 % nikkeliä ja 86 % volframia. Komponentti on joka tapauksessa selvästi kovametalliosa. [27]

Haasteena tämän komponentin kanssa on lähinnä sen hauraus. Useita kappaleita on hajonnut niiden pudottua kivilattialle tai muille koville pinnoille. Komponentti murtuu tällöin hauraaksi ja menee käyttökelvottomaksi. Käyttökohteessaan komponentti kestää tyydyttävästi, ja oikein käytettynä elinikä on riittävän hyvä. Kuvassa 44 on lattialle pudotettuja ja siitä syystä hajonneita suuttimia. [27]



Kuva 44. Lattialle pudonneita suuttimia. [28]

3.1.2 Sekoitinputki (diffuusori)

Diffuusori on paksuseinämainen putki, joka laajenee puolesta välistä sisältä kartiomaisesti. Valmistusmenetelmä on todennäköisesti sama kuin suuttimella. Myös seos on ilmeisesti samaa eli 5 % nikkeliä ja 86 % volframia, mutta varmaa tietoa tästä ei ole. Mikrorakenteesta tai käytetyn pulverin partikkelikoosta ei ole tietoa. [27]

Diffuusorien ennenaikainen kuluminen on merkittävä haaste. Diffuusorien kaulat pyöristyvät suuttimesta tulevan nestevirtauksen voimasta. Virtaussuihkun osuminen diffuusorin kaulaan johtuu osittain virheellisestä asennustavasta, mutta myös eroosiokulumista on havaittavissa komponentista. Diffuusorit kuluvat myös sisältä tynnyrimäisesti. Kuvassa 45 on sekoitinputki, jonka kaula on kulumisen myötä pyöristynyt. [27]



Kuva 45. Käytössä kulunut sekoitinputki. [28]

Diffuusoreista löytyy erilaisia kulumisjälkiä, mutta näistä ei valitettavasti ole dokumentaatioita vaan ainoastaan suusanallista tietoa diffuusorien sisäpintaan on kerrotun mukaan syntynyt kuoppia johonkin kohtaan putken yläneljänneksessä. Myöskään kuoppien geometriasta tai mitoista ei ole tarkempia tietoja. Diffuusorien sisäpinnoissa on kertoman mukaan myös havaittu golfpallon kaltaista pintaa. Joissain kohdissa kulunut pinta on ollut sileää, ja sisäpintojen kauttaaltaan laajenemista, joka alkaa kartiomuodon alkukohdasta, on myös havaittu. [27]

3.1.3 Carrier -runko

Carrier -runko on valmistajan mukaan AISI 630:tä (17-4PH). Rungossa on käytetty myös AISI 329 -seosta. Mikrorakenteesta tai toimitustilasta ei ole tarkempaa tietoa. On epäilty, että komponentti olisi lämpökäsitelty jollain tavalla, mutta käsittelystä ei ole saatavilla mitään tietoja. Komponentti on valmistettu koneistamalla. Kuvassa 46 nähdään carrier -runko, joka on murtunut ylös nostettaessa vääränlaisen käsittelyn seurauksena. [27]



Kuva 46. Carrier -runko, joka on murtunut vääränlaisen käsittelyn seurauksena. [28]

Tämän komponentin haasteet ovat sen sivuissa olevien reikien laajentumiset kulumisen seurauksena, väärinkäytöstä johtuvat murtumat sekä kierteiden tahmautuminen ja murtuminen. Perinteisiä korroosio-ongelmia ei ole sinänsä havaittu. [27]

3.1.4 Bottom nut

Bottom nut on samaa seosta kuin carrier -runkokin. Materiaalin mikrorakenne, toimitus-tila sekä mahdolliset lämpökäsittelyt ovat tuntemattomia. Terässeos on kerrotun mukaan AISI 630 (17-4PH) mutta myös AISI 329:ää on kokeiltu. Tietojen paikkaansa pitävyyttä ei kuitenkaan voida taata. [27]

Bottom nut:t kuluvat voimakkaasti, osa niistä jopa katastrofaalisesti. Kuluminen sisältä on joissain tapauksissa hyvin rajua, eikä terästä juuri ole jäljellä tietyissä kohdissa. Syy siihen, miksi eräät bottom nut:t kuluvat ja toiset eivät, lienee pumpun paineessa, pumpattavan nesteen viskositeetissa, epäpuhtauspartikkelien, kuten hiekan määrässä ja laadussa. Muuttujia on useita eikä niitäkään ole valitettavasti millään tavalla dokumentoitu. Kuvassa 47 on esitelty uusi, tuhoutuneet kierteet omaava sekä katastrofaalisesti kulunut komponentti. [27]



Kuva 47. Uusi, kierteistään pilalle mennyt sekä erittäin kulunut bottom nut. [28]

Toinen haaste on kierteiden tahmaaminen ja sitä kautta kierteiden tuhoutuminen. Bottom nut:ia avattaessa kierteet voivat repeytyä irti, jolloin komponentti on pilalla. Perinteisiä korroosio-ongelmia ei sinänsä ole havaittu. [27]

3.1.5 Housing

Housing eli kotelo, jonka sisällä edellä mainitut komponentit ovat, on SAE 4130 tai 4140 -seosta. Tästäkään asiasta ei ole tarkkaa tietoa. Mikrorakenteesta tai suoritetuista lämpökäsittelyistä ei myöskään ole tietoa. Kotelo on pinnoitettu markkinanimeltään GPD -pinnoitteella. Pinnoitteen on arveltu olevan jonkinlainen boori-lämpökäsittely. Aikaisempi booraus pintakäsittely oli 2-3 tuhannesosa tuumaa paksu. Nyt GPD 10-12 on tuhannesosa tuumaa paksu. [27]

Kotelon haasteita ovat ulostuloaukon puhkikulumiset sekä voimakas taipumus korrodoida kiinni öljyputkistoon. Ongelmat ovat vähentyneet hieman GPD -käsittelyn seurauksena, mutta korroosio on edelleen hyvin rajua putkiston ja kotelon välillä. [27]

4 MATERIAALIN VALINTA JA SEN VAATIMUKSET

Jet pump:n materiaalivalinnassa on monenlaisia haasteita. Ylivoimaisesti suurin hankaluus on se, että kulumismekanismit ovat hyvin moninaiset. Komponenteissa saattaa esiintyä sekä abrasiivista-, eroosio- ja kavitaatiokulumista. Kulumisen voi myös muuttua ajan mittaan yhdestä tyypistä toiseksi. Jokainen öljylähde on yksilöllinen ja niillä jokaisella on omat ominaisuutensa, kuten esiintymän viskositeetti, kemiallinen koostumus, lämpötila ja epäpuhtauksien määrä. Myös huolimattomalla toiminnalla voi olla varsin merkittävät seuraukset. Erilaiset painepiikit voivat aiheuttaa öljylähdeonkalon luhistumisia ja näin lisätä hyvinkin radikaalisti esim. hiekan määrää esiintymästä saatavaan tuotteeseen. Näistä syistä materiaalien pitäisi olla mahdollisimman hyviä kompromisseja kaikkeen mahdolliseen. Tämä ei aina tietenkään ole mahdollista.

4.1 Vaatimukset

Käytännön vaatimus jet pump:lle on lähinnä viiden vuoden huoltovapaa käyttöikä. Kaikkein paras tilanne olisi, jos jet pump:ia ei tarvitsisi nostaa koko tänä aikana ylös kaivosta ja se silti pysyisi riittävän hyvässä kunnossa. Käyttölämpötilat voivat myös vaihdella 50 °C:n – 200 °C:n välillä. Tämä tuo myös omat haasteensa materiaaleille ja tiivisteille. [27]

Korroosion kesto on myös hyvin merkittävässä osassa tämän tyyppisissä komponenteissa. Joissain konstruktioissa saatetaan myös vaatia ei-magneettisia materiaaleja erilaisista syistä. Tavatut korroosioauriot ovat syntyneet pääsääntöisesti vääränlaisen käytön seurauksena ja suuria korroosioaurioita ei ole sinänsä tavattu. On myös otettava huomioon, että komponentit ovat hyvin vähähappisessa ympäristössä, joten korroosion ei pitäisi sinänsä olla suurin huolenaihe. [27]

Lähtökohtaisesti materiaaleista haluttiin kestävämpiä. Tämä saavutetaan käyttämällä kovempia ja sitkeämpiä seoksia. Koska materiaalikokeiden teko kiellettiin, on vaikea tietää, miten nämä vaatimukset voidaan saavuttaa. Tällä hetkellä voidaan vain olettaa nykyisten materiaalien olevan suurin piirtein sitä, mitä valmistaja on niiden luvannut olevan. Käytössä olevat seokset eivät kuitenkaan edusta kaikkein optimaalisinta tapaus-ta, joten on suhteellisen helppoa valita jet pump:iin kovempia ja sitkeämpiä seoksia.

4.2 Koneistamalla vai valamalla?

Valmistusmenetelmän valintaan vaikuttavat eniten kappaleiden materiaalivalinta, geometria sekä toivotut ominaisuudet. Valaminen on toki houkutteleva vaihtoehto mutta käytännössä tähän kohteeseen sopimaton, mikä johtuu siitä yksinkertaisesta syystä, ettei riittävän kovia ja sitkeitä valuteräksiä ole saatavilla. Halutun kaltaista mikrorakennetta ei ole mahdollista saavuttaa kovin yksinkertaisilla menetelmillä.

Myös komponenttien muoto on sen kaltainen, ettei sellaisia ole mielekästä valaa. Päästöjen ja pyöristysten suunnitteleminen näihin kappaleisiin sekä halutun pinnanlaadun saavuttaminen olisi valuteknisesti erittäin haastavaa, ellei lähes mahdotonta. Komponentteja jouduttaisiin myös koneistamaan erittäin paljon valun jälkeen, joten on mielekkäämpää valmistaa komponentit koneistamalla ja kovametalliosat jauhemetallurgisesti. [29]

4.3 Soveltuvat seokset

Jet pump:ssa on luontevinta käyttää jo aikaisemmin hyväksi havaittuja materiaalikategorioita. Tämä tarkoittaa käytännössä kovametalleja sekä lujia ruostumattomia teräksiä. Sopivan teräksen valinnassa tulisi kiinnittää lisähuomiota materiaalien sitkeyteen pitämällä silti materiaalin kovuus riittävän korkealla tasolla.

Näyttäisi siltä, että monet kovametalleissa havaituista vaurioista johtuvat juuri sitkeyden puutteesta. Kovametallien eroosiokulumisen vastustuskykyä voidaan kasvattaa helpoimmin pienentämällä jauheen partikkelikokoa. Pulverimetallurgisissa kappaleissa huokoisuus lisää huomattavasti kavitaatiokulumista, ja siksi huokoisuus tulisi myös minimoida. Kappaleista pitäisi mielellään saada 100 %:sti huokosettomia. [30]

4.3.1 Perinteiset teräkset

Kone- ja rakenneteräkset ovat yleisesti ottaen liian pehmeitä kulumiselle altistuviin käyttökohteisiin. Kovuuden ollessa yksi merkittävimmistä tekijöistä kulumisenkestossa on siis selvää, etteivät tällaiset teräkset kestä kulumista näin vaativissa olosuhteissa. [1, s. 189]

Nuorrutusteräket ovat sopivia kohteisiin, joissa tarvitaan hyvää staattista lujuutta, iskusitkeyttä ja väsymislujuutta. Valitsemalla sopiva päästölämpötila valmistusprosessin aikana voidaan kattavasti vaikuttaa edellä mainittuihin ominaisuuksiin. [1, s. 189]

Hiilipitoisuus nuorrutusteräslaaduissa vaihtelee välillä 0,2 – 0,3 %, ja niiden lämpökäsittelyllä voidaan saavuttaa noin 300 HB:n kovuus. Matalat hiili- ja seosainepitoisuudet takaavat nuorrutusteräksille hyvät hitsausominaisuudet. Siksi nuorrutusteräksiä voidaan käyttää monenlaisissa käyttökohteissa. [1, s. 189]

Kuten nimestäkin voi jo päätellä, **kulutusteräket** sopivat kulumisenkestoa vaativiin kohteisiin. Näistä seoksista valmistetut osat tehdään tavallisesti valamalla ja niissä on nuorrutus- ja rakenneteräksiin verrattuna yleensä enemmän hiiltä ja seosaineita. [1, s. 189]

Perliittisellä runsashiilisellä seostamattomalla teräksellä on saavutettu kulutukselle alttiissa kohteissa jopa parempia tuloksia kuin mihin vastaavan kovuusluokan nuorrutusteräs kykenee. Tällaisia teräksiä käytetäänkin yleisimmin esim. maatalouskoneiden kulumisalttiissa osissa ja rautatievaunujen pyörissä. [1, s. 190]

4.3.2 Runsaasti seostetut teräket

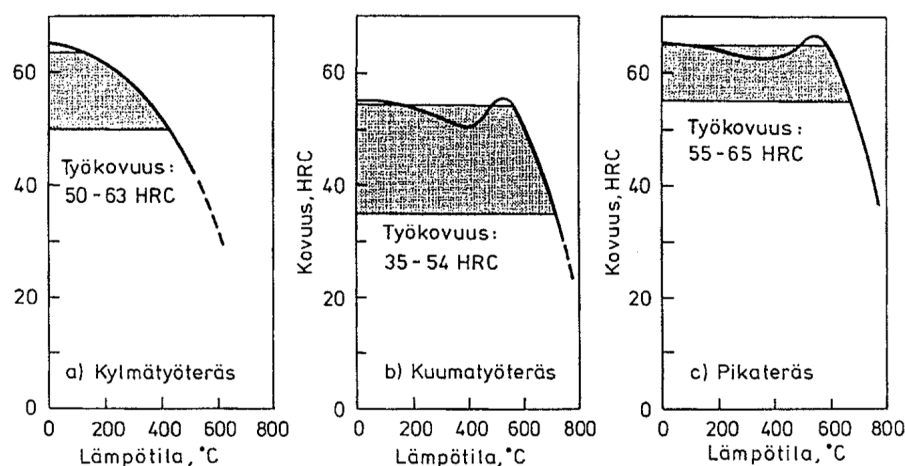
Kovamangaaniteräket (Hadfieldin mangaaniteräket, hiiltä 1,0 % – 1,4 % ja mangaania noin 12 % -14 %) ovat voimakkaasti kylmämuokkautuvia teräksiä. Hadfield-teräksen erityisominaisuus, sen hyvin voimakas kylmämuokkautumiskyky, saavutetaan siten, että teräs lämpökäsitellään austeniittiseksi. Tällöin rakenne muokkautuu kovalle rasituksille altistetuista kohdista ja muuttuu näin kestävämmäksi. Kovuus kasvaa rasiteuissa kohdissa noin 200 HB:stä aina 500 HB:iin asti. [1, s. 190]

Vaativiin iskumaiselle kuormitukselle altistuviin kohteisiin kovamangaaniteräs sopii mainiosti hyvien kulumiskestävyys- ja sitkeysominaisuuksiensa johdosta. Juuri siitä syystä sitä käytetäänkin monesti murskaimissa, kaivinkoneen kauhojen kynsissä ja huu-lilevyissä. [1, s. 190]

Työkaluteräket ovat lämpökäsiteltyjä teräksiä. Työkaluteräket on mahdollista luokitella vielä erikseen kylmä- ja kuumatyökaluteräksiksi. Kylmätyökaluissa teräksen kovuus perustuu sen martensiittiseen mikrorakenteeseen. Myös niiden seostus on pidetty vähäisenä ja siksi ne pehmenevät huomattavasti lämpötilan noustessa yli 250 °C:een. Kylmätyökaluteräket ovat usein sangen kovia ja ne kestävät abrasiivista kulumista hyvin. Niiden kovuudet ovat suurimmillaan HRC 60 - 66 ja työkovuudet ovat HRC 50 – 65 välillä. [1, s. 191]

Kuumatyöteräksien ominaisuudet saavutetaan runsaalla seostuksella, ja siksi ne voidaan lajitella pääseosaineensa mukaan kromi-, molybdeeni-, volframiseosteisiin teräksiin. Näiden terästen kovuus perustuu teräksessä olevien ja päästön aikana syntyvien karbidien kulumiskestävyyteen. Karbidien pysymistä kiinni matriisissa edesauttaa korkea päästölämpötila. Korkea päästölämpötila sitkistää riittävästi muuten martensiittista rakennetta. Kovuudet kuumatyöteräksillä ovat suurimmillaan HRC 50 - 60 ja työkovuudet ovat tällöin HRC 35 - 52 välillä. [1, s. 191]

Pikateräkset ovat hyvin runsaasti seostettuja teräslaatuja, ja niiden kuumakovuus johtuu rakenteellisista ominaisuuksista: pikaterästen mikrorakenne koostuu päästömartensiittisesta matriisista, jossa on suuri määrä kovia karbideja. [1, s. 192] Kuvassa 48 esitellään työkaluteräksien ja pikateräksen käyttölämpötiloja sekä niiden valmistuksessa käytettäviä päästökäyriä.



Kuva 48. Työkaluterästen tavalliset päästökäyrät ja käyttöalueet.

a) kylmätyöteräs b) kuumatyöteräs c) pikateräs [1, s.192.]






Päästömartensiitissa tapahtuva voimakas sekundäärinen karmeneminen aiheutuu seosaineista. Tämän ansiosta martensiitin kovuus voi jopa kasvaa lämpötilan noustessa. Korkea 500 °C:n - 600 °C:n päästölämpötila määrittelee korkeimman käyttölämpötilan sekä takaa hyvät sitkeysominaisuudet. [1, s. 192]

Pääseosaineet muodostavat karbideja, jotka saavat aikaan sekundäärisen karmenemisen. Myös pikateräkset voidaan jaotella pääseosaineen mukaan koboltti-, molybdeeni-, vanadiini- ja volframipikateräksiin. [1, s. 192]

4.3.3 Kovametallit

Kovametallit ovat metallikomposiittimateriaaleja. Niissä käytetään yleensä erittäin kovia volframikarbideja, jotka antavat kovametalleille niille ominaisen kestävyys. Kovametallit ovat yksi kovimmista metallimateriaaleista. Niiden ominaisuuksiin vaikuttaa

kaikkein eniten volframikarbidien koko sekä sidosaineena käytetyn koboltin määrä. Tämä vuorovaikutus käy ilmi selkeästi kuvasta 49. Työkaluteräksiin verrattuna kovametallien kulutuskestävyys voi olla jopa satakertainen. Kovametallit omaavat myös hyvän jäykkyyden (suuren kimmomoduulin), korkean puristusmurtolujuuden sekä hyvän lämmönjohtokyvyn. [31]

	Erittäin vähän kobolttia - erittäin pieni raekoko	Vähän kobolttia - pieni raekoko	Keskimäärin kobolttia - keskimääräinen raekoko	Paljon kobolttia - suuri raekoko	Erittäin paljon kobolttia - suuri raekoko
Vain hankaavaa kulutusta					
Tasaista kulutusta					
Tasaista kuormitusta					
Vaihtelevaa kuormitusta					
Iskumaista kuormitusta					

Kuva 49. Kovametalliseoksen ja rakenteen tyypitystä käyttökohteen mukaan. [31]

Erityisen vaativissa kohteissa kovametallikomponentit kannattaa valmistaa HIP -menetelmällä (Hot isostatic pressing). HIP -menetelmässä kovametalli sintrautuu uunissa korkeassa lämpötilassa ja paineessa. Tällä tavoin kovametallikomponentista kyetään poistamaan huokoisuus käytännössä kokonaan, mikä on usein erittäin toivottavaa. Huokoisuus alentaa merkittävästi komponentin kestävyyttä sekä aiheuttaa sen nopeampaa kulumista. Tämä johtuu mahdollisten säröjen lisääntyneistä ydintymiskohdista mikrorakenteesta. HIP -menetelmässä kovametallin kovuus säilyy ennallaan mutta murtolujuus kasvaa jopa 30 % ei-HIP -menetelmiin verrattuna. [31]

Kovametallien mikrorakenteella on erittäin suuri vaikutus sen eroosiokulumisen kestoon, raekoon ollessa keskeisin parametri. Karbidien koko matriisissa on myös merkittävässä asemassa. Ultra fine -raekoon WC-Co -kovametallien eroosiokulumiskesto sekä kyky vastustaa kolmen partikkelin abraasiota on jopa kaksi kertaa parempi kuin perinteisillä alle yhden mikrometrin raekokoa pienemmillä laaduilla, vaikka ultra fine-raekoon kovametallien kovuus on vain noin 25 % perinteisiä laatuja suurempi. [32]

Kovametalleilla on havaittavissa kahta erityyppistä kulumismekanismia, jotka riippuvat mikrorakenteesta ja iskeytymiskohdasta. Karkeammilla laaduilla kulumisalue vastaa materiaalin mikrorakenteen ominaisuuksia ja materiaali käyttäytyy pääasiassa hauraasti. Alle mikrometrin raekokoisilla kovametalleilla tilanne on päinvastainen ja murtumismekanismi on sitkeän tyyppistä. [33]

Sitkeän murtumismekanismin tapauksissa särön etenemismahdollisuutta kontrolloi sen vapaa kulkumatka matriisissa (binder mean free path). Toisin sanoen mitä pienempänä ja tiheämmässä WC -karbideja on, sitä sitkeämpää kovametalli on. Siksi onkin myös tärkeää, että karbidit ovat tasaisesti jakautuneina materiaalissa. [33]

Kavitaatioeroosion tapauksissa on nähtävissä samankaltaisia tuloksia. Jälleen kerran on havaittavissa kahta vauriotyyppiä, haurasta ja sitkeää. Vauriotyyppin muutos tapahtuu volframikarbidien saavuttaessa $1\text{ }\mu\text{m}$:n raekoon. [32]

Alle $1\text{ }\mu\text{m}$:n raekoon materiaalien altistuessa eroosiohyökkäyksille on havaittavissa bulkkimateriaalin kulumista. Koboltin määrän, sidosaineen vapaan kulkumatkan (binder mean free path) pienentäminen sekä kovuuden kasvattaminen parantavat eroosion kestoa. [32]

Kovametalleilla, joilla raekoko on yli $1\text{ }\mu\text{m}$, on taipumus paikalliseen vaurioitumiseen eroosiorasituksesta. Materiaalihäviö ilmenee kobolttimatriisin kulumisena, joka tapahtuu WC-karbidien ympäriltä. Kulutuksen jatkuessa riittävän pitkään karbidi lopulta irtaantuu matriisista. Itse WC-karbidi ei sinällään kärsi vaurioita eroosiokulumisen aikana. Tällaisilla kovametalleilla eroosion kesto kasvaa kobolttiseostuksen kasvattamisen seurauksena eikä se ole riippuvainen komposiitin murtolujuudesta tai bulkkimateriaalin muodonmuutosparametreista. [32]

Alle $1\text{ }\mu\text{m}$:n raekoon kovametallien eroosiokulumisen kesto voi olla jopa seitsemän kertaa parempi kuin parhaan perinteisten raekoon kovametallien. Tämä on seurausta kulumismekanismin muuttumisesta bulkkimateriaalin irtaamiseksi. Tällä tavoin eroosiokulumisen kestoa parannettaessa myöskään materiaalin sitkeyttä ei tarvitse alentaa. [32]

Kovametalleihin voidaan vaikuttaa myös muilla tavoilla, esimerkiksi erilaisilla seostuksilla. Esimerkiksi yttriumilla stabiloidulla zirkonilla douppaaminen tuo materiaaliin monia mielenkiintoisia ominaisuuksia.

ZrO₂ -partikkelien lisääminen tuotti kovametalliin hienorakeisen komposiittirakenteen, jossa oli enemmän tai vähemmän tasa-akselisia WC -karbideja sekä pyöreäköjä $1\text{ }\mu\text{m}$:n kokoisia stabiloituja zirkonisulkeumia, jotka olivat homogeenisesti jakautuneet matriisin raerajoille. [34]

Yttriumilla stabiloidulla ja zirkonilla douputuilla kovametalleilla näyttäisi olevan perinteisiä WC-seoksia huomattavasti paremmat mekaaniset ominaisuudet. Ne näyttäisivätkin olevan erittäin lupaavia seoksia huomattavan hyvää kulumiskestoa vaativiin kohteisiin. Nämä materiaalit ovat täysin riippuvaisia oikeanlaisesta sintrausprosessista, ja parametrien muutokset sintrauksessa vaikuttavatkin paljon niiden ominaisuuksiin. Lisätut-

kimukset ovat vielä tarpeen, jotta niille optimaalinen sintrausprosessi saadaan kehitettyä. [34]

4.3.4 Ruostumattomat teräkset

Ruostumattomiksi teräksiksi kutsutaan seostettuja teräksiä, joissa on vähintään 10,5 painoprosenttia kromia. Kromiseostus parantaa merkittävästi teräksen korroosiokestävyyttä. Monet ruostumattomat teräkset kestävät esimerkiksi ilmastollista korroosiorasitusta ja soveltuvat täten käytettäväksi useissa erilaisissa kohteissa, kuten elintarvike- ja prosessiteollisuuden laitteistoissa. [35, s. 6]

Ruostumattoman teräksen pintaan syntyy kromista passivoitunut pintakerros, joka suojaa terästä mahdolliselta korroosiolta. Ruostumattomien terästen mikrorakennetta on mahdollista muuttaa erilaisilla seostuksilla. Ruostumattomat teräkset luokitellaan yleensä neljään pääryhmään mikrorakenteensa perusteella. [35, s. 8]

Austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat käytetyin ryhmä näistä materiaaleista. Niiden mikrorakenne stabiloidaan austeniittiseksi nikkelseostuksella. Nikkelin lisäksi austeniittista rakennetta suosivat mm. mangaani, typpi ja hiili. Tyypillinen koostumus austeniittiselle ruostumattomalle teräkselle on 18 % kromia ja 8 % nikkeliä, mutta seostuksen on kuitenkin sisällettävä vähintään 17 % kromia ja 7 % nikkeliä. Austeniittista ruostumatonta terästä lujittaa voimakkaasti välisijoihin atomeina liukenevat hiili ja erityisesti typpi. [35, s. 8]

Ferriittisiä ruostumattomia teräksiä voidaan fysikaalisilta ja osittain mekaanisilta ominaisuuksiltaan verrata tavanomaisiin hiiliteräksiin. Ferriittistä mikrorakennetta stabiloivat seosaineina kromi, pii ja molybdeeni. Kromia tällaisissa teräksissä on yleensä 12 % - 15 % ja hiiltä alle 0,1 %. Ferriittisen ruostumattoman teräksen mikrorakenne on ferriittinen, kuten nimestäkin voi jo päätellä, ja tällainen teräs on myös ferromagneettista. Ferriittiset ruostumattomat teräkset eivät karkene lämpökäsittelyllä, ja rakenteen takaimiseksi ferriittiseksi austeniittia stabiloivien alkuaineiden pitoisuudet pyritään saamaan mahdollisimman pieniksi. [35, s. 9]

Ruostumattomat Duplex -teräkset eli austeniittis-ferriittiset teräkset valmistetaan valitsemalla sopiva kromin ja nikkelin seostus, joka takaa mikrorakenteen koostumisen molemmista faaseista eli siis ferriittistä ja austeniittista. Duplex -teräksiä käytetään tavanomaisten ruostumattomien teräslaatujen sijaan mm. pumppujen pesämateriaalina sekä prosessiteollisuuden säiliöissä. Suunta duplex -terästen kehitystyössä on ollut kohti niukemmin seostettuja lajeja, joissa suurin osa kalliista nikkelistä on korvattu halvemmallalla mangaanilla. [35, s. 9]

Martensiittisiä ruostumattomia teräksiä voidaan karkaista ja tällä tavoin tehdä niistä lujempia. Martensiittisiä ruostumattomia teräksiä käytetään mm. veitsien terämateriaaleina sekä turbiinien siipinä. Martensiittiä saadaan austeniittisestä mikrorakenteesta joko lämpökäsittelyllä tai kylmämuokkauksella. Martensiitti on magneettista ja sillä on korkea lujuus. Yleensä tällaisilla teräksillä on korkea hiilipitoisuus, 0,08 % - 1 %, jota ne tarvitsevat pystyäkseen karmenemaan. Tällaiset teräkset saadaan karkaistua hitaassakin jäähdytyksessä, mutta paremman mekaanisen lujuuden saavuttamiseksi ne yleensä sammutetaan. Sammutus voidaan suorittaa ilmaan, öljyyn tai veteen. Käytettävä jäähdytystapa riippuu teräslaadusta. Teräksen päästäminen ennen käyttöä on hyvä tapa lisätä sen sitkeysominaisuuksia. Yli 0,20 % hiiltä sisältäviä teräslaatuja on yleisesti ottaen hankalampi hitsata. [36]

Martensiittista terästä voidaan valmistaa myös matalahiilisenä. Tällöin siinä on enintään 0,06 % hiiltä ja noin 3 % - 6 % nikkeliä. Tällaisia teräksiä kutsutaan martensiittis-austeniittisiksi tai nikkelimartensiittisiksi. Niiden koostumus on stabiloitu siten, että sammutuksen ja päästön jälkeen mikrorakenteessa on austeniittia ja martensiittia, kuten nimikin jo antaa ymmärtää. Näitä teräksiä on myös melko helppo hitsata, mikä johtuu niiden vähäisestä hiilen määrästä. [36]

Super-martensiitti on matalahiilisistä lajeista jatkokehitetty seos. Sen koostumus sisältää tyypillisesti 11 % - 13 % kromia, 2 % - 6 % nikkeliä, 0 % - 3 % molybdeenia ja enintään 0,030 % hiiltä ja typpeä. Super-martensiittisilla laaduilla on hyvä hitsattavuus, korkea lujuus ja hyvä iskusitkeys. Kaikki martensiittiset terässeokset on luokiteltu ASTM-standardissa 400 -sarjaan. [36]

4.4 Pinnoitteet

Pinnoitteiden käyttö olisi houkuttelevaa, mutta jet pump:n kuluviissa osissa ainakin ruiskutettavien pinnoitteiden käyttö on mahdotonta johtuen komponenttien geometriasta, sillä pinnoitteita ei ole mahdollista ruiskuttaa pienehköjen putkimaisten komponenttien sisäpinnoille. Ainoa pinnoitettava kappale näin ollen voisi olla housing, jonka pintaan tarvittaisiin kova ja korroosiota kestävä pinnoite, jonka pitäisi vielä mielellään olla hyvän näköinen markkinoinnin helpottamiseksi.

Voisi olla myös suotavaa, ettei housing tarttuisi kiinni putkistoon tai näyttäisi pahasti kuluneelta, korrodoituneelta ja rumalta nostettaessa sitä ylös putkistosta oltuaan pidempia aikoja maan alla. Pinnoitteeksi voisi siis sopia WC -pohjainen pinnoite.

4.4.1 Ruiskutettavat termiset pinnoitteet

Ruiskutettavilla WC -pohjaisilla pinnoitteilla on erinomainen kestävyys kulumista vastaan. Pinnoitteita on monia laatuja, joista löytyy useisiin käyttökohteisiin sopiva seos. Pinnoitustavoissa on myös eroja, ja nekin kannattaa ottaa huomioon.

Suurinopeuksiset termiset ruiskutusmenetelmät tarjoavat monia parannuksia perinteisiin pinnoitusmenetelmiin nähden, joissa ruiskutettavien partikkelien nopeudet ovat huomattavasti alempia. Näitä etuja ovat muun muassa pinnoitteen tiheys, sen adheesio ja koheesio, pinnanlaatu ja kovuus sekä kulumisen kesto. Kuvassa 50 on taulukoitu eri termisten pinnoitusmenetelmien ominaisuuksia. Siitä käy hyvin ilmi HVOF- ja varsinkin HVAF -menetelmien erinomaisuus. [37]

Thermal spray methods

Spray method	Temperature (°C) ^(a)	Particle velocity (m/s)	Adhesion (MPa) ^(b)	Oxide content (%) ^(c)	Porosity (%)	Spray rate (kg/h)	Relative cost, low=1	Typical deposit thickness (mm)
Flame	3000	40	8	10-15	10-15	2-6	1	0.1-15
Arc	4000	100	12	10-20	10	10-25	2	0.1-15
HVOF	3000	800	>70	1-5	1-2	2-8	3	0.1-2
HVAF ^(d)	2000-3000	600-1200 ^(e)	>70	*** ^(f)	0-0.2	Carb: 2-30 Met: 2-23 ^(g)	2	0.1-12
Detonation	4000	800	>70	1-5	1-2	0.5-2	4	0.05-0.3
APS	12000	200-400	10-70	1-3	1-5	2-10	4	0.1-1
VPS	12000	400-600	>70	0	<0.5	2-6	5	0.1-1
Cold spray	<800	550-1000	20-70	0	<0.5	6-8	3	0.1-2

Flame=Flame spraying, wire and powder method								
Arc=Arc wire spraying								
HVOF=High velocity oxy-fuel spraying								
HVAF=High velocity air-fuel spraying								
Detonation=Detonation gun spraying								
APS=Atmospheric plasma spraying								
VPS=Vacuum plasma spraying								

(a): Temperature of the heat source								
(b): Depends on deposit material								
(c): Oxide content in metallic deposits								
(d): Equipment manufactured by Uniquecoat Technologies, LLC								
(e): M2 AC-HVAF spray gun: 600-700 m/s; M3 Supersonic spray gun 1000-1200 m/s								
(f): Oxide content= 1.5-2 times oxide content of feed stock								
(g): Depends on gun type: M2 AC-HVAF spray gun; M3 Supersonic spray gun								

Kuva 50. Termisten pinnoitusmetodien vertailua. [37]

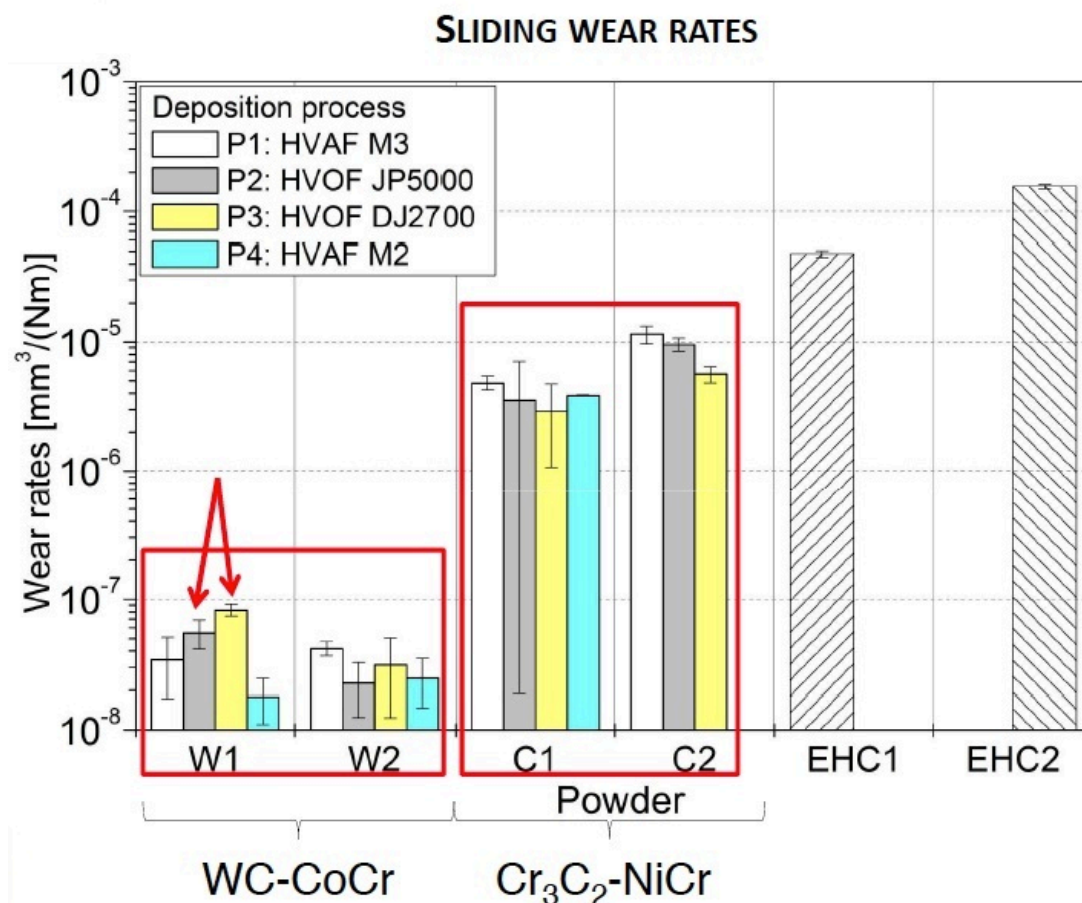
Aiemmin HVOF (High velocity oxygen fuel) -ruiskutus on ollut käytetyin menetelmä, mutta HVAF (High velocity air fuel) on tulossa sen tilalle ja valtaamassa alaa. HVAF -menetelmällä saadaan tiiviimpi pinta, joka kestää enemmän kulutusta. HVAF -menetelmä on myös halvempi, koska polttoaineena käytetään puhtaan hapen sijasta pelkkää ilmaa. [37]

HVAF -menetelmällä on useita kiistattomia etuja HVOF -menetelmään nähden. Suurimmat näistä ovat korkeammat ruiskutusmäärät ja alhaisemmat kustannukset. Kustan-

nuksien alentuminen johtuu pääsääntöisesti siitä, että polttoaine on tavallista ilmaa puh-
taan hapen sijaan ja että myös ruiskutus pistoolin jäähdytys tapahtuu ilmalla, kun HVOF
-ruiskutus pistoolin jäähdytys on toteutettu vedellä. Myös kuluvien tai rikkimenevien
osien määrä on hyvin pieni HVOF -menetelmän laitteistoissa. [37]

HVOF -menetelmän edut näkyvät suoraan itse pinnoitteen laadussa. Pinnoituksesta saa-
daan tiheä ja pinnoite tarttuu myös tiukasti kiinni substraattiin. Korkeasta tiheydestä ja
käytännössä huokoisuuden puuttumisesta johtuen pinnoitteella on myös erinomainen
korroosionkesto. Kulumiskesto on samoista syistä huippuluokkaa. [37] HVOF -
menetelmän kehitti vuonna 1982 James A. Browning halvemmaksi vaihtoehdoksi
HVOF -menetelmälle. Ensimmäiset kaupalliset sovellukset saapuivat 1980-luvun lopus-
sa markkinoille. [37]

Yleisesti saatavilla olevat WC-Co-Cr -pinnoitteet soveltuvat hyvin kotelon (housing)
pinnoittamiseen. Kuvassa 51 on esitys siitä, kuinka paljon HVOF -menetelmä lisää ku-
luminen kestoa toisiaan vasten liukuvien pintojen kulumisen tapauksessa. Kotelon koh-
taama kuluminen on erittäin paljon tämän kaltaista, kun jet pump -laitteistoa lasketaan
öljyputkea pitkin alas oikeaan kohtaan. Öljyputken sisäpinta kaikkine epäpuhtauksineen
raapii tällöin kotelon pintaa.



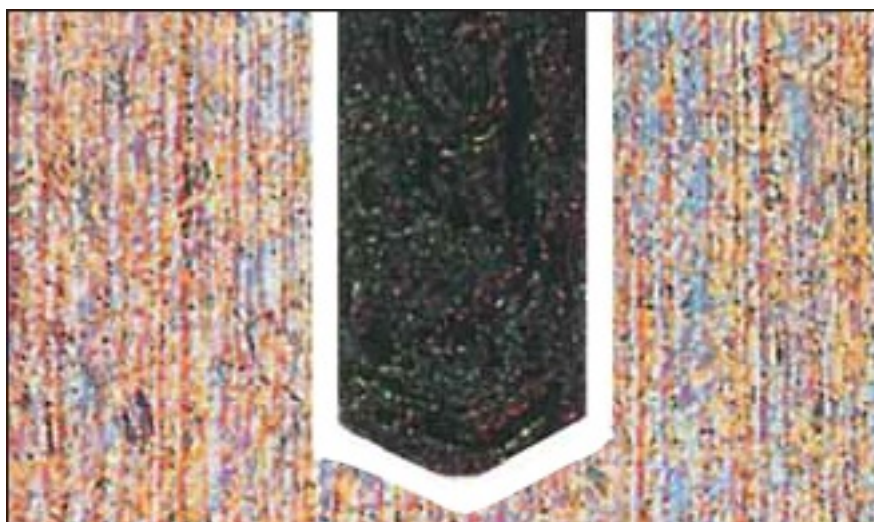
Kuva 51. Erilaisten ruiskutusmenetelmien toisiaan vasten liukuvien pintojen tyypisen kulumisen kestoa. [38]

4.4.2 Lämpökäsittely

Lämpökäsittelyjä on hyvin monenlaisia ja moneen tarkoitukseen sopivia. Tässä työssä lämpökäsiteltäviä osia ovat lähinnä Carrier-runko ja bottom nut. Näiden komponenttien materiaalivalinta sanelee käytännössä tarvittavat lämpökäsittelyt. Materiaalivalinta kohdistuu hyvin todennäköisesti austeniittiseen tai duplex -ruostumattomaan teräkseen, jolloin erinomaiseksi vaihtoehdoksi nousee hellävarainen mutta ominaisuuksiltaan erittäin hyvä kolsterointi (kolstering), joka on austeniittiselle ja ferriittis-austeniittisille (duplex) ruostumattomille teräksille kehitetty uusi ja hellävarainen pintahiilletysmenetelmä. Tämän tyyppisten laatujen pintakarkaisu perinteisillä menetelmillä on hyvin vaikeaa. Kolsteroinnilla voidaan myös pintakäsitellä nikkelipohjaisia seoksia. [39, s. 229]

Kolsteroinnin ajatuksena on hiilettää kappaleen pinta sellaisessa lämpötilassa ja hiiliatmosfäärissä, jossa kromikarbidien muodostumista ei tapahdu. Tunnusomaista tälle menetelmälle on matala hiiletyslämpötila, joka tarkoittaa myös pitkiä käsittelyaikoja. Käsittelyn aikana pinnan hiilipitoisuus kasvaa ja hiiliatomien diffundoituminen teräksen välisijoihin muodostaa siihen suuren puristusjäännösjännityksen. [39, s. 229]

Pintakovuus kasvaa jopa välille 1000 - 1200 HV:iä ja muodostuva kova pinta on tasapaksuinen myös terävissä kulmissa. Näin ollen sama hiiletyspinta muodostuu myös pinnan erimuotoisiin reikiin ja mittaluokaltaan jopa muutaman mikrometrin koloihin ja rakoihin. Kuvassa 52 on esimerkki tällaisesta pienestä reiästä, jossa valkoiseksi värjätty alue on kolsteroinnissa syntynyt pinta. [39, s. 229]



Kuva 52. Kolsteroinnin hiiletyspinnan ulottuminen geometrialtaan hankaliin muotoihin. [40]

Kolsterointi ei alenna teräksen korroosionkestävyyttä, koska siinä ei synny kromikarbiideja. Menetelmä jopa parantaa korroosionkestoa klooripitoisissa ympäristöissä. Eiferriittisillä molybdeeniseostetuilla austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä myös piste-, rako- ja jännityskorroosionkestävyys kasvaa. [39, s. 230]

Kolsteroinnilla on myös muita etuja, kuten esimerkiksi se, ettei käsittely aiheuta mitta- eikä muodonmuutoksia. Värimuutoksia ei myöskään tule kappaleeseen. Yksi merkittävä etu kolsteroinnissa on, ettei se myöskään aiheuta austeniittisiin materiaaleihin magneettisten ominaisuuksien muutoksia. [39, s. 230]

Tämän tutkimuksen tapauksessa kolsteroinnilla on vielä yksi hyvin merkittävä ominaisuus, eli tahmautumis- ja kiinnileikkautumistaipumuksen väheneminen. Tämä on yksi merkittävä ongelma tällä hetkellä jet pump:ssa käytetyissä teräslaaduissa. Kolsteroinnilla saavutetaan kaiken kaikkiaan erittäin kulumis- ja syöpymisenkestävä pintakerros. [39, s. 230]

Kolsterointi soveltuu pienehköille osille, kuten pumppujen osille, suuttimille, venttiileille sekä niiden osille. Carrier-runko ja bottom nut ovat mittojensa puolesta siis täysin soveltuvia kolsteroinnille. Suurin käyttölämpötila kolsteroiduille kappaleille on 300 °C. Jet pump -komponenttien käyttölämpötilat jäävät reilusti tämän alle, joten menetelmä on tämänkin osalta varsin käyttökelpoinen. [39, s. 230]

4.5 Muutosehdotukset

Materiaalin valinta ei ole koskaan yksinkertainen asia, koska se useimmiten on kompromissi useiden tekijöiden välillä. Tässä kohteessa muuttujia on useita, ja jokainen niistä vaikuttaa kulumismekanismeihin eri tavoin. Siksi jet pump:n materiaalivalinta on haastava, eikä yhtä oikeaa ja kaiken kattavaa vaihtoehtoa välttämättä ole olemassakaan.

Valinnassa pitäisi ottaa huomioon työnesteen ja lähteessä olevan raakaöljyn kompositio, lämpötila ja viskositeetti. Myös pumppauksen aikaiset paineenvaihtelut kaivossa ja nesteissä aiheuttavat omat ongelmansa. Epäpuhtauksien määrä ja laatu nesteissä sekä käytettävät tai käyttämättä jätetyt lisäaineet vaikuttavat myös huomattavasti pumppujen elinikään ja kulumisen laatuun.

Tämän työn aikana ei suoritettu kulumiskokeita tai jo käytettyjen materiaalien koostumusten tai ominaisuuksien määrittystä, vaikka niitä suunniteltiin tehtäväksi heti ensimmäiseksi. Kokeet jätettiin pois työn tekijästä riippumattomista syistä, vaikka niiden tekemistä pidettiin erittäin merkittävänä koko tutkimustyön kannalta. Tästä syystä seuraavaksi esitettävät muutosehdotukset ovat vain lähinnä suosituksia, jotka pohjautuvat kir-

jallisuudessa esiin nousseisiin faktoihin ja toisen käden suulliseen tietoon tarkasteltavasta kohteesta. Kulumismekanismeista voidaan esittää vain valistuneita arvauksia, koska erilaisia muuttujia eri pumpuissa, niiden toimintaympäristöissä ja pumppukonfiguraatioissa on useita.

Mikäli tätä tutkimusta halutaan jatkaa, jo käytettyjen materiaalien tarkka määrittäminen ja kulumiskokeiden suorittaminen olisivatkin ensiarvoisen tärkeitä, jotta materiaalien valinta voisi pohjautua paremmalle tietämykselle ja tosiasioille. Kuitenkin myös tässä työssä esitetyt vaihtoehdot ovat ainakin periaatteessa varteen otettavia, sillä ne pohjautuvat yleiseen materiaalitietämykseen.

Alun perin myös termisesti pinnoitettujen komponenttien mahdollista käyttöä haluttiin tutkia. Teräksiset mutta sisäpuoleltaan termisesti WC -pinnoitetut komponentit olisivat hyvin houkutteleva vaihtoehto. Ne olisivat taloudellisempia valmistaa, ja kulumisen ylittäessä tietyt raja-arvot komponenttien pintoja voitaisiin korjata uudelleen ruiskuttamalla. Ne eivät myöskään olisi samalla tavoin hauraita kuten kovametalliosat. Käytössä olevat komponentit osoittautuivat kuitenkin geometrialtaan pääosin sellaisiksi, ettei sekoitinputken, suuttimen tai bottom nut:in sisäpintoja ole mahdollista pinnoittaa termisesti ruiskuttamalla.

4.5.1 Suutin

Suutin oli siinä mielessä koko tutkimuksen helpoin osa, koska sen kohtaamat vauriot johtuvat lähinnä komponentin väärinkäytöstä. Osa ei sinänsä ole nykyiselläänkään liian heikko suunnitellun mukaiseen käyttötarkoitukseensa. Suutinkappale ja siinä käytetty seos kestää asianmukaista käyttöä nykyiselläänkin tyydyttävästi. Siksi olisi jossain määrin perusteltua jatkaa samalla kovametalliseoksella.

Parannusehdotuksia voidaan silti antaa. Olisi suositeltavaa valita sama materiaali ja rakenne kuin sekoitinputkella. Syytkin ovat pääpiirteittäin samat. Suutin olisi järkevä valmistaa HIP -menetelmällä, ellei sitä ole jo niin aikaisemmin tehty. HIP -menetelmällä saavutetaan täysin huokoseton rakenne, eli tämä toimenpide tekee kappaleesta yleensä kestävämmän. Myös kovametalliseoksen jauhekoon pienentämisestä kannattaa harkita, jos taloudelliset seikat vain antavat myöden. Tällä tavoin voidaan lisätä sekä kappaleen sitkeyttä että kovuutta, mikä näkyy parempana abrasiivisen kulumisen, eroosiokulumisen ja kavitaatiokulumisen kestonä.

4.5.2 Sekoitinputki (diffuusori)

Sekoitinputken materiaalivalinta kallistuu lähinnä kovametalleihin, koska myös jo käytössä oleva materiaali on kovametallia. Valinnan tekee kuitenkin haastavaksi se, ettei

osan primääristä kulumismekanismeja kunnolla tunnetta. Oikeastaan se, mitä sekoitinputkessa tarkalleen ottaen tapahtuu ja missä kohdin, jää epäselväksi, koska kattavia kokeita ei tässä työssä voitu suorittaa. Vauriot kuitenkin viittaavat pääosin eroosiokulumiseen ja kavitaatioeroosioon.

Sekoitinputkessa esiintyy varmasti kavitaatiota jossain määrin. Kavitaation välttäminen kohdissa, joissa paine äkillisesti muuttuu, on käytännössä mahdotonta. Kavitaatio tuottaa itsessään vaurioita komponenttiin, mutta se ei ole ainoa tapa, jolla kavitaatiovaurioita syntyy. Kavitoinnin seurauksena tapahtuvat paineiskut poikkeuttavat epäpuhtauspartikkelien lentorataa virtauksessa. Tämän seurauksena sekoitinputken seinämiin iskeytyy partikkeleita, jotka aiheuttavat myös jollain tasolla iskukulumista ja abrasiivista kulumista sekä muita niitä muistuttavia kulumistyypppejä.

Ei kuitenkaan näyttäisi siltä, että kavitaatio olisi primäärinen tämän kappaleen kulumista aiheuttava tekijä. Väitettä voidaan perustella sillä tosiasialla, että työnesteen mukana pumppuun kulkeutuu huomattava määrä hiekkaa ja muita erilaisia epäpuhtauksia, koska pumppujärjestelmän työnesteen suodatusmenetelmät ovat hankalia toteuttaa täysin kattavasti. Voidaankin siis kohtuullisen turvallisesti olettaa, että suuren virtausnopeuden aiheuttama eroosiokuluminen on primäärinen tämän komponentin kulumista aiheuttava tekijä. Tästä syystä kovametalliseoksen tulisi olla ainakin sitkeämpää nykyisin käytettyyn seokseen nähden, jotta sekoitinputken suorituskykyä saadaan parannettua. Sitkeyttä ja tätä kautta kappaleen kestäkyvyn parannusta eroosiokulumista vastaan voidaan saada aikaiseksi mm. jauhekoon pienentämisellä ultrafine-luokkaan, eli alle yhden mikrometrin partikkelikokoon tai jopa mielellään peräti nano-mittaluokkaan. Jauheen partikkelikoko onkin tässä erittäin ratkaisevassa asemassa. WC-partikkelien täytyy myös olla tasaisesti levittyneitä matriisiin, jotta materiaali olisi tasalaatuista ja siten optimaalista.

Seokseksi tulisi valita myös varmuuden vuoksi vähän kobolttia sisältävä vaihtoehto eroosiokavitaation kestoa silmällä pitäen. Pienempi jauhekoko lisää komponentin valmistuskustannuksia ja tällöin myös valmiin komponentin hintaa tuntuvasti, koska materiaalin saanto pienen partikkelikoon jauheesta huononee sekä valmistaminen on ylipäättään vaativampaa. Myös sekoitinputki tulisi valmistaa HIP -menetelmää käyttäen, jotta saavutetaan täysin huokoseton rakenne.

4.5.3 Bottom nut

Bottom nut on ehkä kaikkein ongelmallisin tämän tyyppisen jet pump:n osista, sillä se altistuu erittäin ankaralle eroosio-, kavitaatio- ja mekaaniselle kulumiselle. Olisi ehkä viisasta tutkia, olisiko jet pump:n konstruktio mahdollista muuttaa siten, että myös tämä komponentti voitaisiin valmistaa kovametallista. Tässä konstruktiossa kovametallisen bottom nut:n käyttö ei ole mahdollista, koska kappale altistuu niin monenlaisille rasituksille. Kovametalliosa on tällaiseen käyttöön liian hauras. Mikäli konstruktioita ei

ole mahdollista muuttaa, on siis viisasta pitäytyä materiaalivalinnassa edelleen ruostumattomissa teräksissä.

Bottom nut:n tulee myös sietää monenlaista mekaanista kuormitusta, kuten raskailla työkaluilla tuotettua vääntöä. Komponentissa on aivan erityistä huomiota kiinnitettävä sen kierteisiin. Bottom nut ruuvataan kiinni carrier-runkoon, ja kiertteet ovat tällä hetkellä komponentin toinen kriittinen kohta. Kierteiden kiinnileikkaaminen tahmautumalla on iso haaste, joka johtaa monesti kappaleen kaltoin kohteluun, kun käytettyjä jet pump -rakenteita yritetään avata väkisin erilaisilla työkaluilla.

Bottom nut:n tulisi siis olla hyvin kova ja sitkeä, jotta se kestäisi sisällään kulkevan lietevirtauksen ja ulkopintaan kohdistuvan mekaanisen rasituksen. Sen täytyy olla myös riittävän korroosion kestävä, jotta kierteiden tahmautumista ei esiinny eikä kappaleessa muutenkaan esiintyisi ruostetta. Koska sisäpuolella virtaavan lietteen virtausnopeus on huomattava ja toiminta-atmosfääri on vähähappinen, voidaan myös aiheellisesti epäillä, syntyykö komponentin sisäpintaan koskaan suojaavaa passivaatiokerrosta. Tästä huolimatta lienee silti aiheellista pitäytyä ruostumattoman teräksen käytössä bottom nut:ssa.

Kierteiden tahmautumisen estämisen kannalta erinomainen ratkaisu olisi kolsteroida bottom nut. Komponentti muutenkin hyötyisi kolsteroinnista, koska siten se saavuttaisi erittäin hyvät kovuus- ja sitkeysominaisuudet kaikkiin pintoihinsa. Vaikka kolsterointi antaa komponentin pintaan erinomaiset mekaaniset ominaisuudet, kuluu tämäkin pinta-kerros pois, kun ankarat kulumismekanismit tekevät työtään riittävän kauan. Siksi olisi-kin tärkeää, että myös substraatti olisi laadukasta, kovaa ja riittävän sitkeää terästä.

Martensiittiset seokset ovat tunnettuja kovuudestaan, mutta niiden sitkeysominaisuudet eivät yleensä riitä tähän käyttökohteeseen. Moderneilla duplex-ruostumattomilla teräksillä on saatukin erinomaisia tuloksia tämän kaltaisissa kohteissa, ja parhaimmat niistä vaikuttavatkin hyvin lupaavilta bottom nut:n materiaaliksi. Joissain erityistapauksissa voi olla myös tarpeen, että bottom nut ei olisi magneettinen, jolloin vain austeniittiset seokset tulisivat kysymykseen. Austeniittisilla ruostumattomilla terässeoksilla ei kuitenkaan päästä samoihin kovuuslukemiin kuin duplex-ruostumattomilla teräksillä. Onneksi kolsteroinnin voi suorittaa yhtälailla molemmille edellä mainituille ruostumattomille terässeoksille.

Kaikkiin bottom nut:n asettamiin materiaalihaasteisiin näyttäisi löytyvän duplex-ruostumattomista teräksistä sangen sopiva seos, eli Outokummun 4501, en 1.4501, UNS S32760, joka voisi olla erinomainen valinta tähän kohteeseen. Siinä yhdistyvät sekä tarvittava kovuus että sitkeys. Tämä seos kolsteroituna tulisi olemaan nyt käytettyä seosta ylivertaisesti parempi. [41]

Niissä tilanteissa, joissa komponentin tulisi olla ei-magneettinen, materiaalinvalinta ruostumattomien terästen kategoriasta käy helpoksi. Seoksen täytyy olla tällöin austeniittista ruostumatonta terässeosta. Austeniittisista seoksista Outokummun 253 MA[®], EN 1.4835, UNS S30815 olisi harkinnan arvoinen, vaikka se ei olekaan kestävyydeltään duplex -ruostumattoman teräksen veroista. Tässä seoksessa yhdistyvät silti riittävät kestävyys- ja sitkeysominaisuudet kolsteroinnin antaessa ylimääräistä lujuutta pintoihin. [41]

4.5.4 Carrier -runko

Carrier -rungon haasteet ovat sen sivulla olevien imuaukkojen kulumisen ja kierteiden tahmautuminen. Carrier -rungossa olevien pyöreiden reikien geometria muuttuu käytössä, koska niiden läpi kulkee voimakas lietevirtaus. Kyseessä on epäilemättä eroosiokulumismekanismi, jossa lietteen joukossa olevat epäpuhtaudet kuluttavat carrier -rungon metallia.

Carrier -runko kokee myös mekaanista rasitusta, kun jet pump:n osia avataan tai suljetaan. Näitä toimenpiteitä on välttämätöntä tehdä mm. komponenttien kuntoa tarkistettaessa. Monesti carrier -rungon ja bottom nut:n kierteet ovat tahmautuneet yhteen, jolloin osia väännetään väkivalloin auki. Tällöin carrier -rungon kaula saattaa taipua.

Carrier -runko altistuu rasitukselle myös silloin, kun sitä nostetaan ylös kaivosta. Tämä käy ilmi murtumisjäljistä reikien vierestä. Ne ovat ilmeisesti tulleet nostotilanteessa syntyneen vääntörasituksen seurauksena. On siis selvää, että tämä komponentti hyötyisi myös laadukkaammasta materiaalivalinnasta.

Eroosiokulumisen ja kierteiden tahmaantuminen toisiinsa ovat ne tekijät, jotka olisi syytä korjata. Ratkaisuksi tähän voidaan käyttää samoja menetelmiä kuin bottom nut:n kanssa. Kolsteroinnilla saavutettaisiin paljon kaivattua pintakovuutta ja päästäisiin eroon tahmautumisongelmista.

Olisi ehkä myös käytännöllistä valmistaa carrier -runko samasta seoksesta kuin bottom nut:kin. Carrier -rungolle on myös asetettu samantyyppinen erityisehto kuin bottom nut:lle, eli joissain harvoissa sovelluksissa tämänkin komponentin pitäisi olla ei-magneettinen, mikä on otettava materiaalivalinnassa huomioon. Carrier -rungon materiaalivalintaan pätevät siis samat suositukset kuin bottom nut:lle. Molemmat seokset tulisi kolsteroida erittäin kovan pintakerroksen saavuttamiseksi ja tahmaustaipumuksen estämiseksi.

Kovuutta ja sitkeyttä saataisiin duplex -ruostumattomista teräksistä, joita on käytetty tällaisissa käyttökohteissa aikaisemminkin. Outokummun 4501, EN 1.4501, UNS S32760 olisi varsin sopiva, koska se on erittäin luja ja silti sitkeää. Austeniittisia ruos-

tumattomia teräksiä käytettäessä Outokummun 253 MA[®], EN 1.4835, UNS S30815 seos olisi hyvin varteen otettava vaihtoehto, koska sillä olisi myös riittävä kovuus ja hyvät sitkeysominaisuudet. [41]

4.5.5 Housing

Housing:illä ei tällä hetkellä ole sinänsä ongelmia kulumisen suhteen. Parannusta voitaisiin lähinnä ajatella saatavan korroosionkeston lisäämisestä ja komponentin ulkonäön parantamisesta. Housing:n valmistamista ruostumattomista teräksistä voisi harkita. Pinnoitteen muuttamista HVOF -ruiskutettuun WC-Co-Cr -pinnoitteeseen kannattaa myös harkita.

Materiaalin muuttaminen ruostumattomaan teräkseen lisäisi varmasti korroosionkestoa. Tämä saattaa tuoda silti mukanaan muita ongelmia. Se saattaisi esimerkiksi aiheuttaa galvaanisen parin öljyputkiston ja housing:n välillä. Tästä syystä parempi vaihtoehto saattaisi olla nykyisen boorauksen muuttaminen HVOF -ruiskutettuun WC-Co-Cr -pinnoitteeseen. Näin housing:lle saataisiin houkuttelevampi ulkonäkö, sen korroosionkesto olisi parempi, ja komponentti kestäisi laskun työsyvyyteen ja noston sieltä ylös merkittävästi paremmin.

4.6 Valmistusmenetelmät ja valmistajia Suomessa

Materiaalivalinta tulee sanelemaan komponenttien valmistusmenetelmän ja sitä kautta myös mahdollisen valmistajan. Yrityksiä, joilla on riittävästi tietotaitoa kovametallikomponenttien valmistuksessa ja mahdollisuudet HIP -menetelmän käyttämiseen ei ole Suomessa monia. Bodycote:lla on kokemusta öljyalalta, ja he ovat valmistaneet komponentteja tämän tyyliin sovelluksiin myös aikaisemmin. [42]

Kolsterointia tarjoaa Suomessa vain Bodycote, joten näissä lämpökäsiteltävissä osissa yhteistyökumppanin valinta on selvä. Bodycote:lla on voimassa oleva patentti tähän menetelmään. Toista vaihtoehtoa ei tällaiselle materiaalikombinaatiolle ole siis tarjolla. Bodycote tarjoaa myös komponenttien koneistuksen, joten valinta olisi siinäkin mielessä helppo. [42]

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Aikaisemmin jo mainittujen mutta nyt tekemättä jääneiden kokeiden suorittamista voidaan vilpittömästi suositella, mikäli tätä projektia halutaan viedä eteenpäin. Niiden avulla olisi mahdollista saada syvempää ymmärtämystä vallalla olevista kulumismekanismeista sekä lisätietoa Jet pump:n toiminnasta. Myös käytössä olevien Jet pump:ien kulumisen tarkka dokumentointi sekä kaivojen kattava analysointi olisi tärkeää. Vastapuolella ovat toki taloudelliset ja poliittiset realiteetit, eli aina ei ole mahdollista saada tällaisia tietoja kenttäolosuhteista. Tästä huolimatta tällaisten tietojen keräämiseen pitäisi kuitenkin systemaattisesti pyrkiä.

Jokainen öljylähde on omanlaisensa sekä kemiallisesti, geologisilta ominaisuuksiltaan, että myös toimintaympäristöltään. Komponenttien toimintaolosuhteiden kartoittaminen ja niiden kunnon seuraaminen olisi hyvin tärkeää kulumisilmiöiden selvittämisessä ja kulumisongelmien syiden löytämisessä. Jokaisesta kohteesta olisi hyvä olla käyttöprofiili, josta selviää, kauanko laitteistoa on käytetty ja onko laitteiston käytössä ollut katkoja tai muita poikkeustilanteita.

Käytön aikaisten kulumisprosessien täsmällinen määrittely ei tietenkään ole aina mahdollista, joten materiaalien tulisi olla jo lähtökohtaisesti mahdollisimman hyviä kompromisseja kaikenlaisiin mahdollisiin tilanteisiin. Tätä on tietenkin mahdotonta täydellisesti toteuttaa, sillä kaikkiin mahdollisiin kulumistilanteisiin ei voida etukäteen varautua. Tämän työn perusteella valituilla materiaaleilla tulee kuitenkin ehdottomasti olla esimerkiksi hyvät sitkeysominaisuudet, sillä pelkällä materiaalin kovuudella ei selvitä eroosio- tai kavitaatio- tai kavitaatioeroosiokulumisesta. Sitkeyden kasvattaminen materiaalissa näyttääkin olevan avainasemassa monia kulumisilmiöitä vastaan taisteltaessa.

Tällä hetkellä tarkastellussa konstruktiossa käytetyt seokset eivät ilmeisestikään ole kaikkein parhaimpia jet pump:n komponenttien tarpeisiin. Kulumisen on osassa komponenteista jopa katastrofaalista. Oikein suunnitelluilla materiaalivalinnoilla olisi mahdollista pidentää huomattavasti jet pump:n ja sen komponenttien elinikää. Parempia materiaaleja on tarjolla, ja niitä olisi viisasta myös käyttää. Parempilaatuisten materiaalien käyttöä voidaan perustella taloudellisestikin ajateltuna. Hienommat seokset ja valmistusmenetelmät toki kohottavat komponenttien valmistuskustannuksia, mutta lopputyö käyttäjä hyötyy silti kalliimmasta pumpusta, joka toimii varmemmin ja ilman öljyntuotannon käyttökatkoja. Jo muutaman tunnin tauko tuotannossa saattaa maksaa kokonai-

sen pumppuyksikön verran. On selvää, että useimmat asiakkaat haluavat parempaa laatua ja ovat myös valmiita maksamaan siitä.

Olisi myös ensiarvoisen tärkeää ymmärtää Jet pump:n toimintaa kokonaisuudessaan. Vaikka aihetta on tutkittu suhteellisen paljonkin mm. virtausopin kannalta, jet pump:iin liittyvä materiaaliopillinen tietämys ja kulumis-ilmiöiden ymmärtäminen kokonaisuutena eivät tällä hetkellä ole vielä riittävällä tasolla. Yksi esimerkki tästä on se, miten kavitaatio aiheuttaa turbulenttia virtausta ja siten eroosiota, vaikka itse kavitaatio ei tapahtuisikaan kuluvan metallin pinnassa. Tällaisten kokeiden suorittaminen ja aiheen tutkiminen vaatisivat joitakin erityisjärjestelyitä, mutta ne eivät olisi mitenkään mahdottomia. Näin saataisiin erinomaista tutkimustietoa kulumisilmiöiden ja kavitaatiotilanteiden synergisistä vaikutuksista jet pump:ssa.

Kulumisen perimmäisten syiden jäädessä nyt teoreettisen pohdinnan varaan on syytä pitää materiaalivalinta suhteellisen konservatiivisena ja valita jo käytettyjen seoksien kaltaisia materiaaleja, joilla on kuitenkin paremmat ominaisuudet jo käytössä oleviin laatuihin nähden. Siksi kaikkien edellä mainittujen tekijöiden pohjalta voidaan suositella käytettäväksi jo ennalta suhteellisen toimiviksi todettuja materiaalikategorioita. Uusien materiaalikategorioiden käyttöönotto tässä tilanteessa voi pahimmillaan tuoda mukanaan lukuisan määrän uusia haasteita. Tämäkin puoltaa sitä ajatusta, ettei ole tarvetta ulottaa materiaalivalintaa täysin uusiin materiaalikategorioihin, koska jo tässä työssä ehdotetuilla valinnoilla olisi varmasti positiivinen vaikutus jet pump:n kokonaiskestokykyyn.

Yhteenvetona voidaan todeta, että raskaimmalle kulumiselle altistuvissa komponenteissa olisi hyvä käyttää erityisen laadukkaita kovametalleja, joissa on kiinnitetty huomiota sitkeyteen esim. erittäin hienon partikkelikoon, koboltiseostuksen sekä HIP - valmistusprosessin kautta. Näin kovametallikomponentit saattaisivat kestää väärinkäyttöäkin hieman paremmin. Oikeassa käyttökohteessaan ne olisivat yliverkaisia nykyisiin materiaaleihin nähden.

Teräksisissä komponenteissa erityisen lujat duplex -ruostumattomat teräkset vaikuttavat hyvin lupaavilta jo pelkkien numeroidenkin valossa. Tässä työssä ehdotetulla runsaasti seostetulla duplex -seoksella on nelinkertainen $R_{p0.2}$ -myötölujuus ja seitsemänkertainen venymäprosentti tällä hetkellä käytettyyn seokseen nähden. Perusmateriaali olisi siis jo itsessään ylivoimainen entiseen materiaaliin nähden.

Runsasseosteisen duplex -ruostumattoman teräksen käyttö ei ole yksinään täysin riittävä toimenpide vastaamaan teräskomponenttien kohtaamaa toimintaympäristöä. Olisi luultavasti järkevää lämpökäsitellä komponentit vielä kolsteroimalla. Silloin niissä yhdistyisivät mitä parhaimmalla tavalla sekä erinomaiset lujuus- että sitkeysominaisuudet. Kols-terointi antaisi teräskomponenteille ehdottoman kovan pinnan jopa kierteisiin ja muihin

geometrialtaan hankaliin muotoihin. Tällöin komponenttien pinta olisi jopa yli kahdeksan kertaa kovempi nyt käytettyyn seokseen nähden. Tällaisen lisäsuojan voidaan ajatella olevan hyödyllinen erityisesti bottom nut:ssa ja Carrier -rungossa. Toinen kolsteroinnin kiistämätön hyöty olisi kierteiden tahmautumisen estyminen. Näillä keinoilla teräksiset komponentit jet pump:ssa olisivat erityisen korkealaatuisia ja tulisivat kestäämään kulutusta aivan eri mittakaavassa nykyisiin materiaaleihin nähden.

Uudet materiaalit ja niiden toimivuus olisi kuitenkin syytä varmistaa jo käytössä oleviin seoksiin verrattuna ennen kuin ne otettaisiin laajamittaisesti käyttöön. Näin saataisiin myös mahdollisesti tietoa siitä, kuinka paljon parempi elinikä uusilla materiaaleilla olisi tarkalleen ottaen vanhoihin verrattuna. Kokeissa saattaisi myös ilmetä uusia haasteita, koska esimerkiksi kulumisen painopiste voisi siirtyä johonkin toiseen kohtaan laitteistossa. Siksi olisi tärkeää tutkia myös tätä seikkaa.

Jet pump:n materiaalivalinta on lopulta kiinni hyvin monesta eri tekijästä. Vaikuttaisi siltä, että nyt käytössä olevat materiaalit ovat valikoituneet pitkälti siksi, että ne ovat olleet yleisesti tunnettuja ja helposti saatavilla olevia seoksia. Tässä tutkimuksessa esitetyt materiaaliehdotukset eivät varmasti myöskään ole täydellisen tyhjentäviä ratkaisuja jet pump:n haasteisiin, koska materiaalivalinta on kuitenkin aina jollain tasolla kompromissi. On silti perusteltua esittää, että nyt ehdotetuilla valinnoilla ainakin osa nykyisistä ongelmista voitaisiin joko kokonaan välttää tai ainakin niiden vaikutusta pienentää ja siten parantaa mm. jet pump:ien toiminta-aikaa ja kustannustehokkuutta.

LÄHTEET

- [1] Kivioja, Seppo. Kivivuori, Seppo. Salonen, Pekka. 1997. Tribologiakitka, kuluminen ja voitelu. 2. painos. Helsinki, Otatieto. 346 s.
- [2] Erdemir, A., Martin, J.-M., 2007, New materials and coatings for superlubricity and near-wearless sliding, Proceedings of the ASME/STLE IJTC 2007
- [3] Research Group, 1969. Wear of Engineering Materials, Glossary of Terms and Definitions in the Field of Friction, Wear and Lubrication, Tribology O.E.S.D. Publications, Paris.
- [4] M.A. Moore. 1981. Abrasive Wear, ASM Materials Science Seminar on Fundamentals of Friction and Wear of Materials, 4-5 October 1980, Pittsburgh, Pennsylvania, editor: D.A. Rigney, Metals Park, Ohio, Publ. ASM, pp. 73-118.
- [5] Stachowiak G. W. & Batchelor A. W. 2005. Engineering tribology 3. painos, Burlington, Elsevier Butterworth-Heinemann Ltd. 832 s.
- [6] Electric Energy Online.com. Electrical contacts in MV & HV Power Circuit breakers. [WWW]. [Viitattu 28.10.2013]. Saatavissa: http://www.electricenergyonline.com/?page=show_article&article=306 28.10. 2013
- [7] Gordon England, Independent Metallurgist and Consultant to the Thermal Spray Coating Industry, Abrasive wear. [WWW]. [Viitattu 28.10.2013]. Saatavissa: <http://www.gordonengland.co.uk/wear.htm>
- [8] Sevim, Ibrahim & Eryurek, I. Barlas: 2006b. Effect of abrasive particle size on wear resistance in steels, Materials and Design 27 (2006). Elsevier LTD. pp. 173–181
- [9] Bobrov S. N. 1993b. Structural changes in steel during abrasive wear. I. M. Gubkin State Academy of Oil and Gas. Translated from Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metalov, No. 11 (November, 1993). pp. Plenum publishing corporation. 18-21.
- [10] Modi, Anand Prakash. 2006. Effects of microstructure and experimental parameters on high stress abrasive wear behaviour of a 0.19 wt% C dual phase steel. Tribology International 40 (2007). Elsevier LTD. pp. 490–497.
- [11] Dagasan E., Odabas, D, Gerçekciog, E. 2009. Effect of the microstructure on the erosive wear rate of AISI 1020 and AISI 8620 steels. 11th International Conference on

Tribology - Serbiatrib '09. Belgrade, Serbia, 13 - 15 May 2009. Serbian Tribology Society. pp. 64-67.

[12] Bruce, R. W. 2010. Handbook of lubrication and tribology, Vol. II, Theory and Design, Second edition. CRC Press. 1169 s.

[13] Klies, I. Kulu, P. 2008, Solid particle erosion occurrences, prediction and control, Springer-Verlag, London U.K. 206 s.

[14] Drensky, G. Hamed, A. Tabakoff, W. Abot, J. 2011. Experimental investigation of polymer matrix reinforced composite erosion characteristics, Wear, 270 (2011) (3–4), Elsevier Science B.V. pp. 146 – 151.

[15] Grant, G. Tabakoff, W. 1975. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental particles. Journal of Aircraft, 12 (5), pp. 471 – 478.

[16] Kotwal, R. and Tabakoff, W. 1981. A new approach for erosion prediction due to fly ash, Journal of Engineering for Power, 103, pp. 265 – 227.

[17] Goodwin et al. 1969. Study of erosion by solid particles, Proceedings of Instrumentation Mechanical Engineers, 184, pp. 279 – 289.

[18] Clark H. Mcl. 1991. On the Impact Rate and Impact Energy of Particles in a Slurry Pot Erosion Tester, Wear, Vol. 147 (1991), Elsevier Science S.A. pp. 165 - 183.

[19] S. Dosanjh, J.A.C. Humphrey. 1985. The Influence of Turbulence on Erosion by a Particle-Laden Fluid Jet, Wear, Vol. 102 (1985) Elsevier Science S.A. pp. 309 - 330.

[20] Y.-M. Chen, 2002. Cavitation Erosion, Failure Analysis and Prevention, Vol 11, ASM Handbook, ASM International, pp 1002–1012

[21] Krella, A. et al. 2009. Cavitation resistance of Cr–N coatings deposited on austenitic stainless steel at various temperatures. Wear 266 (2009). Elsevier Science B.V. pp 800 – 809.

[22] Richman, R.H. 2002. Liquid-Impact Erosion, Failure Analysis and Prevention, Vol 11, ASM Handbook, ASM International, pp 1013 – 1018

[23] Focus-it. [WWW]. [Viitattu 9.12.2013 klo. 21.00]. Saatavissa: <http://eswt.net/wp-content/uploads/2011/10/cavitation.gif>

- [24] Bregliozzi, G. et al. 2005. Cavitation wear behaviour of austenitic stainless steels with different grain sizes. *Wear* 258 (2005). Elsevier Science B.V. pp. 503 – 510
- [25] Liknes, F. 2013. Jet Pump, Master Thesis. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 47 s.
- [26] Tech-Flo. [WWW]. [Viitattu 26.02.2014 klo 21.43]. Saatavissa: <http://techflo.net/downloads/TFCJetPumpCompletions2013.pdf>,
- [27] Palaveri, Wellquip Oy, Pori. 17.4.2013
- [28] Kuvaaja Dino Nerweyi
- [29] Alihankinta 2013, Tampere, Pirkkahalli, 25.9 2013, Savolainen, P, sulatusinsinööri (DI), Valimoinstituutti.
- [30] Kondoha, K. Umedaa, J. Watanabe, R. 2009. Cavitation resistance of powder metallurgy aluminum matrix composite with AlN dispersoids. *Materials Science and Engineering A* 499 (2009). Elsevier Science B.V. pp. 440 – 444.
- [31] Kovametalli-In. [WWW]. [Viitattu 05.03.2014 klo 19.00]. Saatavissa: <http://www.kovametalli-in.fi/Pages/Kovametallinominaisuudet.aspx>
- [32] Pugsley, V.A. Allen, C. 1999, Microstructure/property relationships in the cavitation erosion of tungsten carbide–cobalt, *Wear* 233–235 (1999). Elsevier Science B.V. pp 93–103.
- [33] C. Allen, C. Sheen, M. Williams, J. Pugsley, V.A. 2001. The wear of ultrafine WC–Co hard metals. *Wear* 250 (2001). Elsevier Science B.V. pp 604 – 610.
- [34] Hussainova, I. et al. 2012. Erosive wear of advanced composites based on WC. *Tribology International* 46 (2012). Elsevier Ltd. pp 254 – 260
- [35] Taulavuori, T. Kyröläinen, A. Manninen, T. Ruostumattomat Teräkset, 2001, 5. painos. Teknologiateollisuus ry. 64 s.
- [36] euro inox, The European Stainless Steel Development Association. [WWW]. [Viitattu 12.03.2014 klo 15.30]. Saatavissa: http://mobile.euroinox.org/map/martensitic_stainless_steel_grades/FI_martensitic_stainless_steel_grades.php

- [37] Niemi, K. 2013. Advanced coatings by high velocity thermal spray technologies. 6.11.2013 Advances in Surface Engineering & TWC International Wear seminaari, TTY
- [38] Bolelli, G. Lusvarghi, L. 2013. Tribological properties of thermal spray coatings, 6.11.2013 Advances in Surface Engineering & TWC International Wear seminaari, TTY
- [39] Kivivuori, S. Härkönen, S. Lämpökäsittelyoppi, 2004, toinen painos, Teknologia-teollisuus ry. 295 s.
- [40] Bodycote [WWW]. [Viitattu 20.03.2014 klo 10.30]. Saatavissa: <http://internet.bodycote.org/kolsterising/en/literature.html>
- [41] Outokumpu [WWW]. [Viitattu 21.03.2014 klo 9.30]. Saatavissa: <http://steelfinder.outokumpu.com/>
- [42] Alihankinta 2013, Tampere, Pirkkahalli, 25.9 2013, Erik Saviranta, myyntijohtaja Bodycote